



ITS

Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - EE 184801

IDENTIFIKASI HUBUNG SINGKAT ANTAR BELITAN PADA MOTOR BLDC MENGGUNAKAN METODE EAR

Restu Wicaksono
NRP 07111440000015

Dosen Pembimbing
Dimas Anton Asfani, ST., MT., Ph.D.
Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019



TUGAS AKHIR - EE 184801

**IDENTIFIKASI HUBUNG SINGKAT ANTAR BELITAN
PADA MOTOR BLDC MENGGUNAKAN METODE EAR**

Restu Wicaksono
NRP 07111440000015

Dosen Pembimbing
Dimas Anton Asfani, ST., MT., Ph.D.
Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019



FINAL PROJECT - EE 184801

**SHORT CIRCUIT IDENTIFICATION OF INTER TURN
WITHIN BLDC MOTOR USING EAR METHOD**

Restu Wicaksono
NRP 07111440000015

Advisor
Dimas Anton Asfani, ST., MT., Ph.D.
Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019

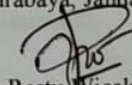
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tugas akhir saya dengan judul "**IDENTIFIKASI HUBUNG SINGKAT ANTAR BELITAN PADA MOTOR BLDC MENGGUNAKAN METODE EAR**" adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Januari 2019



Restu Wicaksono
07111440000015

Halaman ini sengaja dikosongkan

IDENTIFIKASI HUBUNG SINGKAT ANTAR BELITAN PADA MOTOR BLDC MENGGUNAKAN METODE EAR

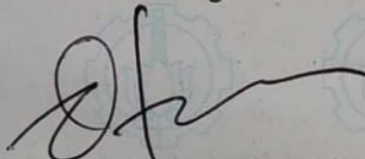
TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada

Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

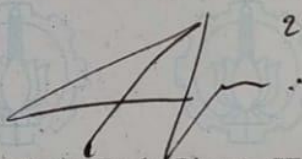
Menyetujui :

Dosen Pembimbing I



Dimas Anton Asfani, ST., MT., Ph.D.
NIP. 198109052005011002

Dosen Pembimbing II



22-01-19

Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.
NIP. 197311192000031001



Halaman ini sengaja dikosongkan

IDENTIFIKASI HUBUNG SINGKAT ANTAR BELITAN PADA MOTOR BLDC DENGAN METODE EAR

Nama mahasiswa : Restu Wicaksono

Dosen pembimbing I : Dimas Anton Asfani, ST., MT., Ph.D.

Dosen pembimbing II : Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.

Abstrak:

Hubung singkat antar belitan merupakan sebuah kondisi yang sering terjadi pada peralatan listrik salah satunya adalah motor BLDC. Apabila tidak terdeteksi dan dibiarkan saja, kondisi hubung singkat ini dapat merusak kondisi motor. Maka dari itu sangat penting untuk mengidentifikasi kegagalan hubung singkat sebelum terlambat. Untuk mencegah hal tersebut, tegangan surja dapat digunakan sebagai metode diagnosis dan perawatan untuk mengetahui kondisi motor. Uji tegangan surja dilakukan dengan cara menginjeksikan tegangan surja ke belitan motor yang ingin diidentifikasi. Untuk mengetahui respon motor ketika diberi tegangan surja, pengujian dilakukan pada keadaan *off-line*. Gelombang respon surja ini kemudian dianalisa menggunakan metode *Error Area Ratio* (EAR). Metode ini membandingkan respon dari gelombang ketika motor dalam keadaan normal dan ketika motor dalam keadaan hubung singkat. Sehingga akan didapatkan sebuah nilai yang merepresentasikan seberapa besar gangguan yang terjadi berdasarkan standar yang telah ditentukan. Hasil yang didapat adalah terdapat perbedaan bentuk gelombang ketika motor dalam keadaan normal dan dalam keadaan hubung singkat. Sehingga kita dapat menentukan kondisi motor dikatakan normal atau dalam keadaan rusak.

Kata kunci: Motor BLDC, Hubung singkat, EAR, *Offline* tes.

Halaman ini sengaja dikosongkan

SHORT CIRCUIT IDENTIFICATION OF INTER TURN WITHIN BLDC MOTOR USING EAR METHODE

Student name : Restu Wicaksono
Supervisor I : Dimas Anton Asfani, ST., MT., Ph.D.
Supervisor II : Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.

Abstract:

A short circuit between turns is a rather frequent condition that occurred in an electrical equipment, one of them is BLDC motor. If we can detect it and left that neglected, this short circuit will break the motor condition. Therefore, it is important to identify the failure of short circuit before too late. To prevent it from happening, we might use the surge test as a method to identify the short circuit and maintain the motor condition. The application of surge test is performed by injecting a surge voltage into targeted motor turn. To determine the motor response when the surge is applied, the test is performed in offline condition. After that, we analyze the surge response pulse using Error Area Ratio (EAR). This method is performed by comparing the pulse in a normal condition and in a short circuit condition. Therefore, it is possible to obtain the value that represent how big the occurring trouble based on the pre-mentioned standard. The result show that there is a distinctive difference in the pulse formation when the motor is in normal condition and short circuit condition. Therefore, we can judge whether the motor is normal or broken.

Key Word: BLDC Motor, Short Circuit, EAR, Offline test.

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji Syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas segala Rahmat, Karunia, dan Petunjuk yang telah dilimpahkan-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan tugas akhir dengan judul **“IDENTIFIKASI HUBUNG SINGKAT ANTAR BELITAN PADA MOTOR BLDC MENGGUNAKAN METODE EAR”**.

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan jenjang pendidikan S1 pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Atas selesainya penyusunan tugas akhir ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah SWT atas limpahan rahmat, karunia dan petunjuk-Nya yang menunjang kelancaran proses penyelesaian tugas akhir ini.
2. Ibu dan Bapak penulis atas doa yang selalu dipanjatkan dan kasih sayang yang menjadi semangat dan motivasi untuk penulis dalam keadaan apapun.
3. Bapak Dimas Anton Asfani selaku dosen pembimbing pertama yang telah memberikan arahan, bimbingan, saran, kritik dan perhatiannya selama proses penyelesaian tugas akhir ini.
4. Bapak Dedet Candra Riawan selaku dosen pembimbing kedua yang telah memberikan arahan, bimbingan, saran, kritik dan perhatiannya selama proses penyelesaian tugas akhir ini.
5. Seluruh dosen dan karyawan Departemen Teknik Elektro ITS yang telah memberikan banyak ilmu dan menciptakan suasana belajar yang luar biasa.
6. Saudara dan teman-teman yang selalu memberakan bantuan dan dukungan semangat hingga detik-detik terakhir, Rizki, Nailil, Rizal, Prasetyo, Ghufro, Shodek, Epan, Dhanang, Hadi, Mas Wahyudi, Mas Angga, Mas Adit, Mas Ikhlas dan Mas Arif.
7. Keluarga besar Lab Tegangan Tinggi atas segala dukungan dan bantuannya.
8. Pak Nur, Pak Alif, Pak Indra, Mas Uta, Arif dan segenap keluarga besar GESITS ITS yang dengan senang hati menerima dan memberikan ilmu baru untuk tugas akhir ini.

9. Teman-teman seperjuangan e54 yang telah menemani dan memberikan dukungan selama masa kuliah sampai penyusunan tugas akhir ini.

Penulis telah berusaha maksimal dalam penyusunan tugas akhir ini. Namun tetap besar harapan penulis untuk menerima saran dan kritik untuk perbaikan dan pengembangan tugas akhir ini. Semoga tugas akhir ini dapat memberikat manfaat yang luas.

Surabaya, Januari 20190

Restu Wicaksono
07111440000015

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	vii
LEMBAR PENGESAHAN	ix
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT.....	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL.....	xvii
1. BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar belakang.....	1
1.2 Permasalahan.....	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Metodologi	3
1.6 Sistematika Penulisan.....	4
1.7 Relevansi	5
2. BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Motor BLDC	7
2.2 Kegagalan Isolasi Antar Belitan Pada Mesin Listrik.....	8
2.3 Tes Surja.....	9
2.4 IEEE 522 dan Rekomendasi Tegangan Tes surja.....	12
2.5 Metode <i>Error Area Ratio</i> (EAR).....	13
3. BAB 3 PANCANGAN SISTEM DAN ALAT	17
3.1 Konfigurasi Sistem.....	17
3.2 Perancangan Hardware	21
3.3 Perancangan Arduino	23
3.4 Perancangan Perangkat Motor BLDC	24
3.5 Perancangan Skema Tes surja	27
4. BAB 4 PENDETEKSIAN KERUSAKAN ISOLASI MOTOR BLDC MENGGUNAKAN METODE EAR.....	33
4.1 Hasil dan Analisis Pengujian Rangkaian <i>Walton Cockroft</i>	33
4.2 Hasil dan Analisis Pengujian <i>Rise time</i> Gelombang Surja	34
4.3 Hasil dan Analisis Pengujian Nilai Resistansi dan Induktansi	35

4.4 Hasil dan Analisis Tes surja Pada Motor BLDC Normal	37
4.5 Hasil dan Analisis Tes Surja Motor BLDC Dengan Hubung Singkat Antar Belitan Dalam Satu Fasa	39
4.6 Hasil dan Analisis Tes surja Hubung singkat Antar Belitan Pada Fasa Yang Berbeda	46
4.7 Data <i>Threshold</i> Hasil Pengujian	53
BAB 5 PENUTUP	54
5.1 Kesimpulan	55
5.2 Saran	56

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1	Konstruksi motor BLDC[5]	7
Gambar 2. 2	Stator BLDC motor.....	8
Gambar 2. 3	Motor BLDC dengan hot spot antar belitan.....	9
Gambar 2. 4	Rangkaian Autotrafo dengan Walton Cockroft	11
Gambar 2. 5	Skema Switch Penghubung	11
Gambar 2. 6	Pemodelan rangkaian uji surja	12
Gambar 2. 7	Standar rise time pada IEEE 522[16].....	13
Gambar 3. 1	Blok diagram konfigurasi sistem tes surja	18
Gambar 3. 2	Konfigurasi peralatan.....	18
Gambar 3. 3	(a) Siglent SHS 1062 (b) Verivolt Entube DE-HB	20
Gambar 3. 4	Rangkaian Walton Cockroft 4 Stage.....	21
Gambar 3. 5	Rangkaian Walton Cockroft	22
Gambar 3. 6	Skema implementasi switch 1 dan switch 2.....	23
Gambar 3. 7	Rangkaian switching dan kapasitor surja.....	23
Gambar 3. 8	Flowchart Program Arduino	24
Gambar 3. 9	Konfigurasi Belitan Motor BLDC	25
Gambar 3. 10	Skema belitan motor BLDC pada stator	25
Gambar 3. 11	Motor BLDC tes surja.....	26
Gambar 3. 12	Skema tes surja dengan hubung singkat antar Turn A2	27
Gambar 3. 13	Skema tes surja dengan hubung singkat antar Turn B3	28
Gambar 3. 14	Skema tes surja dengan hubung singkat antar Turn C3	28
Gambar 3. 15	Skema tes surja antar fasa	29
Gambar 3. 16	Skema tes surja fasa A-B	30
Gambar 3. 17	Skema tes surja fasa A-C	31
Gambar 3. 18	Skema tes surja fasa B-C.....	32
Gambar 4. 1	Grafik perbandingan pengujian dengan perhitungan	34
Gambar 4. 2	Perbandingan frekuensi perhitungan dan pengujian	37
Gambar 4. 3	Gelombang surja fasa A-N kondisi normal.....	38
Gambar 4. 4	Gelombang surja fasa A-B kondisi normal.....	38
Gambar 4. 5	Tes surja dalam satu fasa A	40
Gambar 4. 6	Perbandingan gelombang fasa A-N	41
Gambar 4. 7	Grafik perbandingan %EAR.....	42
Gambar 4. 8	Perbandingan gelombang fasa B-N	43
Gambar 4. 9	Grafik perbandingan %EAR.....	44
Gambar 4. 10	Perbandingan gelombang fasa C-N	45
Gambar 4. 11	Grafik perbandingan %EAR.....	46

Gambar 4. 12	Tes surja dengan fault antar Turn	47
Gambar 4. 13	Perbandingan gelombang FASA A-B	48
Gambar 4. 14	Grafik perbandingan %EAR FASA A-B.....	49
Gambar 4. 15	Perbandingan gelombang FASA A-C	50
Gambar 4. 16	Grafik perbandingan %EAR Fasa A-C.....	51
Gambar 4. 17	Perbandingan gelombang FASA B-C.....	52
Gambar 4. 18	Grafik perbandingan %EAR Fasa B-C.....	53

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Standar tegangan tes surja [8].....	13
Tabel 2. 2 Kriteria Pass/Fail EAR	14
Tabel 3. 1 Spesifikasi Reed Relay	19
Tabel 3. 2 Spesifikasi IGBT.....	19
Tabel 4. 1 Hasil pengujian dan perhitungan Walton Cockroft	33
Tabel 4. 2 Nilai Resistansi dan Induktansi motor BLDC	36
Tabel 4. 3 Perbandingan Nilai Frekuensi Perhitungan dan Pengujian...	36
Tabel 4. 4 Hasil pengujian test-reff EAR Motor BLDC Normal	39
Tabel 4. 5 Hasil Test-reff EAR pengujian phasa A-N	41
Tabel 4. 6 Hasil Test-reff EAR pengujian fasa B-N.....	43
Tabel 4. 7 Hasil Test-reff EAR tes surja fasa C-N	45
Tabel 4. 8 Hasil analisis tes surja antar fasa pada belitan 7	48
Tabel 4. 9 Hasil analisis tes surja antar fasa pada belitan 7	50
Tabel 4. 10 Hasil analisis tes surja antar fasa pada belitan 7	52
Tabel 4. 11 Nilai Threshold Belitan Normal	54
Tabel 4. 12 Nilai Threshold Hubung Singkat	54

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar belakang

Motor *Brush Less DC* (BLDC) merupakan sebuah motor dengan teknologi yang memiliki berbagai variasi dalam pemanfaatannya. Pada motor BLDC, terdapat beberapa karakteristik yang baik seperti memiliki nilai daya yang besar, efisiensi kerja yang optimal, variasi kecepatan yang besar namun memiliki daya yang tetap konstan, nilai torsi yang cenderung besar pada kecepatan rendah, dengan momen inersia yang kecil, serta biaya produksi yang nilainya sebanding dengan keandalan performa yang dimiliki[1]. Karakteristik yang dimiliki oleh motor BLDC inilah yang menjadikan alasan membuat aplikasi motor BLDC ini semakin bervariasi. Begitu juga tentang aplikasi motor BLDC pada kendaraan bermotor. Salah satu buktinya adalah skuter listrik hasil penelitian yang dimiliki Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) yang diberi nama *Garasindo Electric Scooter ITS* (GESITS). Skuter listrik GESITS ini juga memanfaatkan motor BLDC sebagai penggerakannya.

Skuter listrik GESITS yang dikembangkan langsung di ITS ini dapat dipantau dengan *smartphone* berbasis Android. Selain desainnya yang menarik, skuter listrik GESITS juga memiliki beberapa kelebihan lain yakni kapasitas dan performa baterai yang baik. Skuter listrik GESITS ini diharapkan dapat membantu mengatasi masalah penghematan bahan bakar fosil dan penanggulangan emisi karbon dari kendaraan bermotor yang ada. Untuk menunjang performa motor BLDC yang digunakan pada skuter listrik GESITS, maka diperlukan sebuah peralatan yang menunjang perawatan dan pengecekan secara berkala.

Salah satu kondisi yang sering dialami motor BLDC adalah gangguan hubung singkat antar belitan (*inter turn short circuit*). Kondisi ini sering terjadi karena isolasi pada belitan yang ada pada motor BLDC rawan terkelupas sehingga dapat menyebabkan gangguan pada performanya. Namun, saat ini harga peralatan diagnosis untuk perawatan skuter listrik masih tergolong mahal. Solusi efektif dan ekonomis untuk mengatasi permasalahan tersebut adalah dengan menggunakan alat uji tegangan surja untuk diagnosis motor BLDC. Metode deteksi kerusakan yang digunakan untuk menganalisis hasil diagnosis adalah *Error Area Ratio* (EAR). Metode EAR ini, dapat mendeteksi motor BLDC apabila terjadi suatu gangguan hubung singkat yang terjadi pada belitannya. Yaitu

dengan cara diuplai menggunakan tegangan surja. Tegangan surja yang dihasilkan akan dianalisis perbedaannya pada saat sebelum dan sesudah motor BLDC diberi gangguan hubung singkat. Alat uji surja ini diharapkan dapat mengurangi biaya perawatan dan biaya diagnosis sehingga bermanfaat untuk masyarakat.

1.2 Permasalahan

Skuter listrik GESITS pada dasarnya tidak membutuhkan pemeliharaan yang bermacam-macam seperti halnya kendaraan berbahan bakar fosil. Tetapi skuter listrik GESITS tetap memerlukan diagnosis secara berkala untuk mengetahui kondisi, kualitas dan usia motor listrik yang sedang digunakan. Namun, Diagnosis ini pada dasarnya membutuhkan biaya yang relatif mahal karena harga peralatan yang digunakan juga mahal. Sehingga dibutuhkan sebuah alat diagnosis yang murah. Salah satu Metode yang dapat dijadikan sebagai alternatif adalah dengan memanfaatkan alat uji tegangan surja. Metode ini diharapkan dapat menunjang kelancaran penelitian dan pengembangan skuter listrik GESITS.

Tegangan surja yang akan diberikan ke motor BLDC membutuhkan sebuah rangkaian untuk menaikkan tegangan dan menyearahkannya. Pada tugas akhir ini rangkaian yang digunakan untuk menaikkan tegangan adalah rangkaian *Walton Cockcroft*. Tegangan *output* selanjutnya diteruskan menggunakan rangkaian *switching*, untuk mengubahnya menjadi tegangan surja. Tegangan surja yang terbentuk diharapkan mampu menghasilkan nilai osilasi yang berbeda ketika diujikan pada motor BLDC yang baik maupun rusak.

Hasil *output* osilasi yang muncul selanjutnya akan dianalisis menggunakan metode EAR, sehingga permasalahan berikutnya adalah bagaimana metode ini dapat membedakan kondisi motor BLDC yang normal dan rusak sesuai standar.

1.3 Tujuan

Tujuan pada tugas akhir ini adalah :

1. Membuat modul pembangkitan tegangan surja yang terdiri dari rangkaian pembangkitan tegangan tinggi DC, rangkaian *switch* untuk kapasitor surja.
2. Menyusun motor BLDC dengan belitan-belitan tiap *turn* yang diberi penanda secara manual untuk pengujian antar *turn* dengan skema yang bervariasi.

3. Mendeteksi gangguan hubung singkat antar *turn* berdasarkan nilai dari metode EAR.
4. Menganalisis gelombang yang di dapat dengan metode EAR untuk mengetahui kondisi motor BLDC.
5. Hasil tugas akhir menjadi salah satu referensi standar keamanan pada diagnosis dan monitoring untuk pengembangan skuter listrik GESITS.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada tugas akhir ini adalah membahas bagaimana cara mengidentifikasi kerusakan pada motor BLDC akibat adanya hubung singkat antar belitan dengan menggunakan metode EAR. Hasil yang didapatkan metode ini berupa perbandingan motor BLDC pada kondisi normal dan kondisi rusak akibat hubung singkat antar belitan.

1.5 Metodologi

Metodologi yang digunakan pada penelitian ini dapat dijabarkan sebagai berikut:

1. Studi Literatur
Pada tahap ini dilakukan pembelajaran dari teori teori mengenai uji surja pada motor BLDC. Terori yang berkaitan didapatkan melalui makalah dan jurnal. Hal yang telah dipelajari dijadikan dasar dari pengerjaan tugas akhir.
2. Perancangan alat uji surja
Alat uji surja dirancang pada penelitian ini, sehingga dapat melakukan uji surja pada motor BLDC. Hal ini dilakukan berdasarkan penelitian yang sebelumnya telah dilaksanakan mengenai perancangan alat uji surja.
3. Permodelan dan *re-winding* motor BLDC
Motor BLDC yang digunakan pada tugas akhir ini sebelumnya dilakukan *re-winding* agar tidak memiliki kecacatan belitan, serta mempermudah skema dan variasi pengambilan data selama dilakukan pengujian. Sehingga, data yang didapatkan pada pengujian dapat dikatakan valid.
4. Uji surja
Uji surja dilakukan pada belitan saat kondisi normal dan pada tiap variasi hubung singkat yang telah diberikan pada motor BLDC. Pengujian ini dilakukan secara bertahap pada sisi pada tiap-tiap belitan yang ada.

5. Analisis data

Setelah melakukan pengujian, data yang didapatkan pada pengujian dianalisis menggunakan metode *Error Area Ratio* (EAR). Dengan menggunakan metode ini maka dapat dianalisis mengenai uji surja yang telah dilakukan.

6. Penyusunan buku

Penyusunan buku dilakukan sesuai dengan tahap pengerjaan yang ada, kemudian dilengkapi dengan data uji, analisis data, dan lampiran yang dibutuhkan. Sehingga dapat diambil kesimpulan.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam tugas akhir ini terdiri atas lima bab dengan uraian sebagai berikut :

BAB 1 : Pendahuluan

Bab ini membahas tentang penjelasan mengenai latar belakang, permasalahan, tujuan, batasan masalah, metode penelitian, sistematika penulisan, dan relevansi.

BAB 2 : Tinjauan Pustaka

Bab ini membahas mengenai dasar teori yang digunakan untuk menunjang penyusunan tugas akhir. Teori penunjang yang digunakan adalah seperti motor BLDC, kegagalan isolasi, tes surja, pembangkitan tegangan tinggi DC, standar uji, dan *Error Area Ratio* (EAR).

BAB 3 : Perancangan Tes surja

Bab ini membahas mengenai perancangan alat untuk melakukan pengujian. Perancangan alat tersebut meliputi *re-winding* BLDC, penggunaan alat uji surja, dan penggunaan alat pengukuran.

BAB 4 : Hasil dan pembahasan

Bab ini membahas mengenai pengambilan data uji surja, pengolahan gelombang surja, dan analisis terhadap hasil data yang didapatkan saat pengujian.

BAB 5 : Penutup

Bab ini membahas mengenai kesimpulan dan saran yang bisa diambil dari pengujian yang telah dilakukan.

1.7 Relevansi

1. Untuk Ilmu Pengetahuan

Pada ilmu pengetahuan, diharapkan penelitian ini dapat menjadi referensi penelitian gangguan hubung singkat antar belitan pada motor BLDC diuji menggunakan uji surja.

2. Untuk Industri

Pada penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat terhadap industri yang menggunakan motor BLDC sebagai referensi dari efek gangguan hubung singkat antar belitan secara umumnya. Serta sebagai referensi diagnosis dan perawatan motor BLDC untuk sekutr listrik GESITS secara khususnya.

Halaman ini sengaja dikosongkan

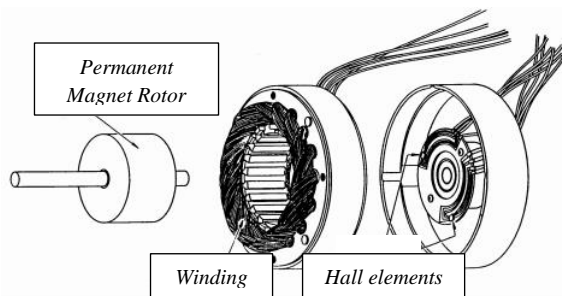
BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Motor BLDC

Motor BLDC banyak digunakan secara luas dalam bidang industri, dan instrumentasi. Motor BLDC tidak memiliki komutator mekanik yang tahan terhadap keausan pada permukaan dan *arcing* akibat adanya arus yang mengalir pada motor. Magnet yang terdapat pada rotor Motor BLDC menghasilkan medan magnet konstan yang menghasilkan efisiensi dan faktor daya yang tinggi. Dibandingkan dengan motor DC yang menggunakan sikat maupun motor induksi, Motor BLDC memiliki beberapa keuntungan diantaranya memiliki nilai daya yang besar, efisiensi kerja yang optimal, variasi kecepatan yang besar namun memiliki daya yang tetap konstan, nilai torsi yang cenderung besar pada kecepatan rendah dengan momen inersia yang kecil, serta biaya produksi yang nilainya sebanding dengan kehandalan performa yang dimiliki[2].

Konstruksi dari Motor BLDC hampir menyerupai motor AC, disebut juga motor sinkron dengan magnet permanen. Konstruksi motor BLDC dapat dilihat pada Gambar 2.1. Pada bagian lilitan stator memiliki konstruksi hampir sama dengan bentuk lilitan pada motor AC dan pada rotor. Motor BLDC berbeda dengan motor AC sinkron dimana pada bagian deteksi posisi rotor (*magnetic poles*) yang digunakan untuk menghasilkan sinyal kontrol pada *switch* elektrik dengan menggunakan sensor optik sebagai sensor posisi rotor[3][4].



Gambar 2. 1 Konstruksi motor BLDC[3]

Prinsip kerja dari *permanent magnet* motor BLDC merupakan teori medan magnet, yaitu saat kutub utara dengan kutub selatan menghasilkan medannya masing-masing maka akan saling tolak menolak dengan kutub sejenis. Prinsip ini juga berlaku pula sebaliknya, dimana kutub yang tidak sejenis akan saling tarik menarik. Sehingga hal inilah yang menimbulkan arus listrik pada kumparan.



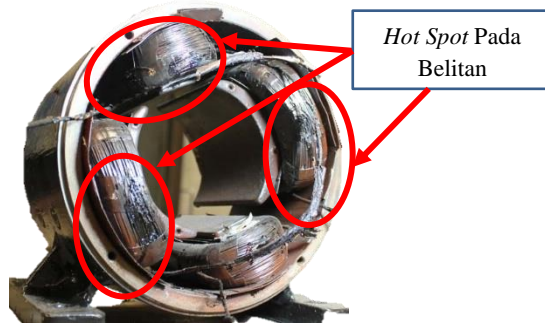
Gambar 2. 2 Stator BLDC motor

2.2 Hubung Singkat Pada Belitan Motor

Kegagalan Isolasi pada belitan motor listrik merupakan salah satu kerusakan paling sering terjadi, kegagalan isolasi ini mengakibatkan kinerja motor listrik menjadi semakin menurun dan membahayakan struktur motor listrik. Kerusakan biasanya diawali dengan penurunan nilai isolasi pada dua belitan yang saling berdekatan pada belitan motor[5]. Kegagalan isolasi pada belitan motor ini yang menyebabkan terjadinya kerusakan hubung singkat antar belitan. Kerusakan ini disebabkan oleh tidak mampunya isolasi pada belitan untuk menahan arus dan tegangan pada konduktor agar tidak terhubung dengan belitan lainnya. Akibat dari terhubungnya antar belitan ini maka dapat memengaruhi nilai induktansi dari mesin listrik. Kerusakan pada isolasi terjadi karena adanya kontaminasi, arus yang berlebihan pada belitan, kerusakan mekanik, suhu, dan tekanan.

Kegagalan isolasi antar belitan umumnya ditandai dengan munculnya *hot spot* (luka bakar) pada belitan. Dibawah ini adalah contoh

gambar kegagalan isolasi antar belitan yang ditandai dengan munculnya *hot spot*.



Gambar 2. 3 Motor BLDC dengan hot spot antar belitan

2.3 Tes Surja

Tes surja adalah tes yang dilakukan secara *offline*, untuk mengetahui kekuatan isolasi antar belitan pada belitan stator pada motor induksi maupun trafo. Tes surja juga dapat dilakukan pada motor BLDC karena pada motor BLDC terdapat belitan (gulungan) pada statornya[6]. Tes surja umumnya dilakukan untuk mengetahui tegangan impuls pada belitan stator pada motor BLDC, kondisi yang memengaruhi level tegangan pada belitan. Kelebihan tes surja adalah mudah mendeteksi adanya perubahan nilai induktansi apabila terdapat kerusakan pada belitan[7].

Tes surja dilakukan dengan mengalirkan arus pada suatu belitan dengan sangat cepat sehingga timbul tegangan pada belitan sesuai dengan prinsip induksi pada belitan[8]. Nilai dari induksi pada belitan stator pada motor BLDC dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.1.

$$V = L \frac{di}{dt} \quad (2.1)$$

Dimana:

V = Tegangan terminal yang timbul pada belitan

L = Induktansi pada belitan

Tegangan terminal adalah tegangan total yang timbul akibat adanya induktansi pada belitan. Peralatan pembangkitan tegangan surja

didesain agar dapat mengetahui kerusakan belitan akibat adanya gangguan hubung singkat antar belitan[7].

Dalam tes surja, sebuah kapasitor yang telah berisi muatan dengan level tegangan tertentu dihubungkan dengan belitan motor secara langsung sehingga terjadi *discharge*. Hubungan antara kapasitor tegangan tinggi dengan belitan motor mengakibatkan sistem seperti tangkai RLC. Jika terjadi hubung singkat pada belitan, maka frekuensi respon tegangan surja pada belitan juga berubah dan dapat diketahui perbedaannya[9]. Gelombang surja yang terbentuk memiliki frekuensi osilasi yang timbul pada belitan motor yang dapat dimodelkan seperti persamaan berikut[6][10].

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} \quad (2.2)$$

Dimana:

f = frekuensi

R = jumlah resistansi rangkaian

L = nilai induktansi belitan trafo

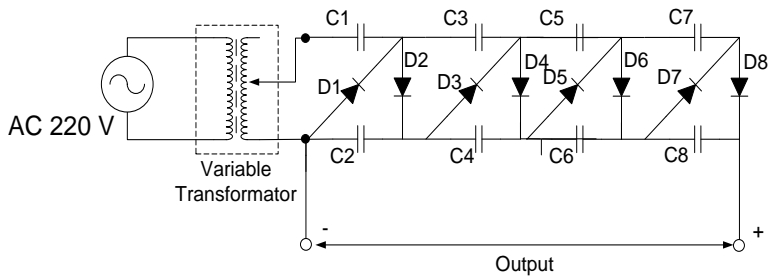
C = nilai kapasitansi kapasitor surja

Dari persamaan diatas dapat diketahui jika isolasi belitan rusak, maka menyebabkan induktansi belitan menurun, sehingga frekuensi isolasi akan bertambah yang dapat mengindikasikan terjadi hubung singkat.

Surge test terdiri dari beberapa bagian, diantaranya adalah bagian pembangkit tegangan tinggi DC, *switch* penghubung, kapasitor tegangan tinggi, kontroler dan *oscilloscope*.

a. Pembangkit tegangan tinggi DC

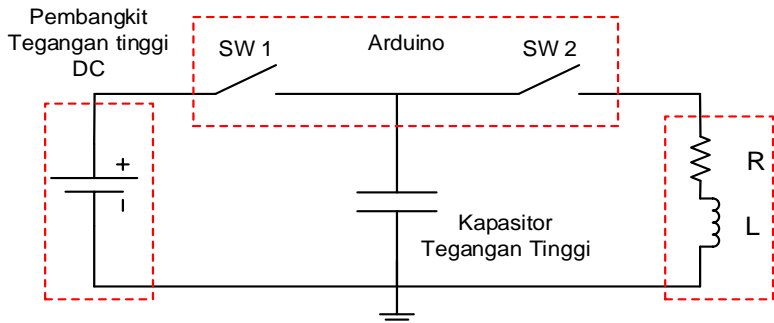
Pembangkitan tegangan tinggi DC yang digunakan untuk uji tegangan surja adalah DC dengan *rating* tegangan mencapai 4-6 kali tegangan nominal[11]. Nilai tegangan ini didapat dengan menginjeksikan tegangan AC 220V ke tegangan tinggi DC dengan menggunakan rangkaian *Walton Cockroft*. Nilai *input* 220V AC akan di atur menggunakan autotrafo sehingga mendapatkan nilai tegangan *output* DC yang bervariasi sesuai dengan tegangan tes surja yang digunakan.



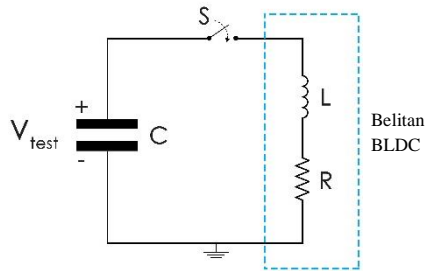
Gambar 2. 4 Rangkaian Autotrafo dengan Walton Cockcroft

b. Switch penghubung

Switch penghubung yang digunakan terdiri dari dua buah *switch* yang memiliki *rating* tegangan diatas 1000V ,tegangan tersebut dimaksudkan agar mekanisme *switching* berjalan dengan baik. Dua buah *switch* ini selanjutnya dikontrol oleh Arduino.



Gambar 2. 5 Skema Switch Penghubung



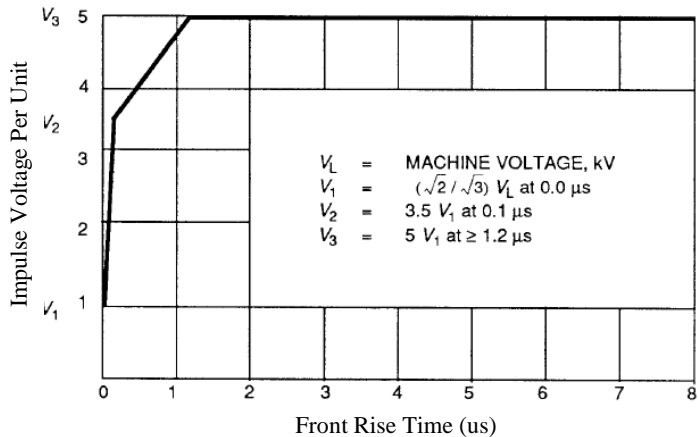
Gambar 2. 6 Pemodelan rangkaian uji surja

2.4 Standar Pengujian Surja

Dalam menentukan standar tegangan surja, terdapat tegangan minimal yang harus dipenuhi agar tegangan mampu melewati sela udara diantara belitan. Berdasarkan *Baker Instrument*, rekomendasi tegangan yang disarankan agar dapat melewati celah udara adalah sebesar 500V. Berdasarkan IEEE 522, rekomendasi tegangan uji surja tergantung pada nilai *rise time* tegangan surja yang digunakan serta spesifikasi motor yang diuji. *Rise time* adalah waktu yang dibutuhkan oleh gelombang surja dari keadaan 30% sampai 90% nilai tegangan dikalikan 1.67[7].

Nilai *rise time* ini menyebabkan timbulnya frekuensi yang cukup tinggi saat tegangan surja melalui belitan. Pada gelombang dengan nilai *rise time* 0 hingga 1 us direkomendasikan dengan tegangan uji sebesar 3.5 p.u. Sedangkan untuk gelombang dengan *rise time* lebih dari 1.2 us direkomendasikan dengan menggunakan 5 p.u. Namun, pada kenyataannya perbedaan isolasi belitan membuat hasil tes surja menjadi beraneka ragam.

Pada standar yang diberikan EASA, nilainya lebih umum untuk semua kondisi gelombang yang terbentuk. Standar EASA tidak memberikan rincian *rise time* pada nilai standarnya. Standar tegangan tes surja dapat dilihat pada tabel 2.1.



Gambar 2. 7 Standar rise time pada IEEE 522[10]

Tabel 2. 1 Standar tegangan tes surja [12]

<i>Vline</i>	IEEE 522		EASA
	<i>Per Unit</i>	<i>New Coil</i> 3.5 pu	<i>In Service</i> 75% New
480	392	1372	1029
575	469	1643	1232
600	490	1715	1289
2300	1878	6573	4930
4160	3397	11888	8916
6900	5634	19718	14789
13800	11268	39437	29578

2.5 Metode *Error Area Ratio* (EAR)

Metode *Error Area Ratio* (EAR) memiliki keunggulan untuk mendeteksi perbedaan dua gelombang dengan sangat baik. Metode EAR digunakan oleh komputer untuk mengetahui ukuran kuantitatif perbedaan dua buah gelombang dengan perbedaan sekecil mungkin[10]. Gelombang surja yang diuji pada motor BLDC dibandingkan dengan gelombang referensi untuk mengetahui perbedaannya. Persamaan EAR dapat dilihat pada persamaan berikut.

$$EAR = \frac{\sum_{i=1}^N |F_i^{(1)} - F_i^{(2)}|}{\sum_{j=1}^N |F_j^{(1)}|} \times 100 \quad (2.3)$$

Dimana:

$F_i^{(1)}$ = titik ke-i pada gelombang refrensi

$F_i^{(2)}$ = titik ke-i pada gelombang pengujian

Contohnya saat tes surja pada motor BLDC dengan kondisi normal maka akan menimbulkan frekuensi osilasi yang berbeda dengan tes surja yang dilakukan pada motor BLDC yang mengalami hubung singkat antar belitan. Kedua gelombang tersebut dibandingkan dengan metode EAR dan dapat dilihat seberapa besar perbedaannya.

Metode EAR terdiri dari tiga, yaitu *Pulse to Pulse* EAR (P-P EAR), *Line to Line* EAR (L-L EAR), dan *Test-Ref* EAR[10]. Prinsip metode ini secara matematis membandingkan perbedaan gelombang surja antar fasanya. Selanjutnya P-P (*Pulse to Pulse*) EAR. Prinsip metode ini secara matematis membandingkan perbedaan gelombang pengujian terhadap gelombang pengujian sebelumnya dengan menaikkan tegangan surja secara bertahap hingga mencapai nilai maksimumnya. Berikutnya, *Test-Ref* EAR yang digunakan untuk pengujian menggunakan belitan yang banyak yang memiliki spesifikasi yang sama. Prinsip metode ini yaitu membandingkan gelombang surja dari salah satu belitan motor dengan gelombang surja belitan motor yang lain. Tabel 2.2 merupakan kriteria *pass/fail* dari ketiga metode yang dilakukan pada metode EAR dalam menganalisis tegangan surja[13]. Tabel 2.2 merupakan kriteria *pass/fail* dari ketiga metode yang dilakukan pada metode EAR dalam menganalisis tegangan surja[13].

Tabel 2. 2 Kriteria Pass/Fail EAR[14]

	L-L EAR	P-P EAR	Test-Reff EAR
Manufacturing	5-15% - <i>No</i>	5-15%	5-15%
Rotor Installed	15-65%	5-15%	10-25% or <i>Higher</i>

Dari data diatas, nilai kriteria yang digunakan pada tugas akhir ini menggunakan manufacturing dengan No rotor installed. Kriteria yang digunakan pada penelitian kali ini adalah untuk L-L EAR menggunakan 15%, dan untuk Test-Reff EAR menggunakan 10%. Nilai tersebut memiliki maksud jika nilai EAR pana Motor BLDC hasil tes surja melebihi nilai kriteria Pass/Fail yang digunakan, maka Motor BLDC tersebut *Fail* dan dapat dikategorikan terdapat kerusakan.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 3

PERANCANGAN SISTEM DAN ALAT

3.1 Konfigurasi Sistem

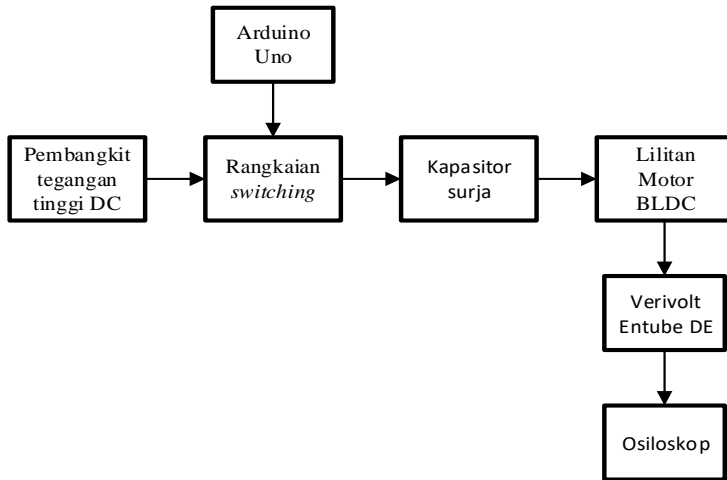
Pelaksanaan penelitian deteksi kerusakan antar turn dengan uji tegangan surja meliputi beberapa hal, diantaranya adalah perancangan rangkaian tes tegangan surja, perancangan belitan motor BLDC, dan persiapan peralatan untuk akuisisi data serta analisis hasil pengujian. Secara blok diagram, konfigurasi system yang disusun dapat dilihat pada gambar 3.1

Pada pengujian ini terdapat beberapa komponen utama yaitu:

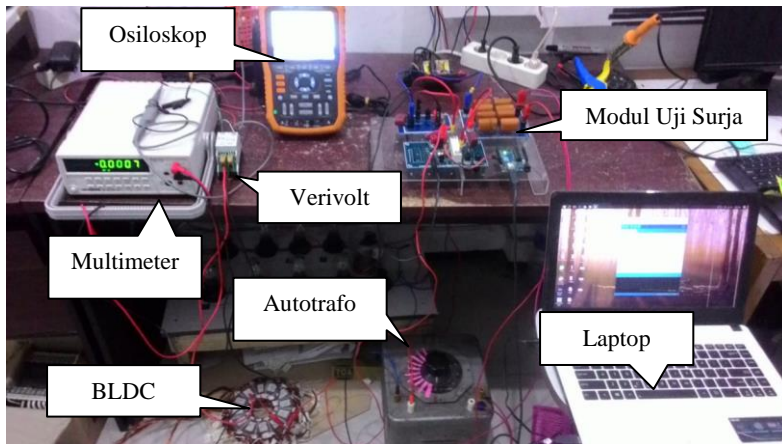
1. Autotrafo
2. Rangkaian *Walton Cockroft 4 Stage*
3. Rangkaian *switching*
4. Arduino Uno sebagai *controller* rangkaian *switching*
5. Kapasitor surja
6. Osiloskop Siglent SHS 1062
7. Verivolt Entube DE-HB sebagai penurun tegangan sebelum masuk ke osiloskop
8. Dan *software* lainnya untuk pengolahan data

Proses pengujian tegangan surja dimulai dengan autotrafo sebagai sumber tegangan untuk menyuplai tegangan ke rangkaian pembangkit tegangan tinggi DC yaitu rangkaian *Walton Cockroft*. Tegangan yang telah dinaikan selanjutnya digunakan untuk pengisian kapasitor surja (*charging*). Pengisian kapasitor surja dilakukan dengan mengaktifkan relay (*switch 1*) tegangan tinggi menggunakan kontrol Arduino. Ketika mekanisme *switching* diaktifkan, Arduino akan mengirimkan sinyal ke *switch 1* untuk menutup dengan *delay* selama 5 detik, sehingga kapasitor surja akan terisi oleh tegangan tinggi DC. Sesaat setelah pengisian kapasitor surja selesai, maka *switch 1* dibuka, secara bersamaan *switch 2* (IGBT) tertutup dan dihubungkan dengan belitan motor BLDC. Proses tersebut membuat muatan pada kapasitor surja yang telah terisi mengalir ke belitan motor BLDC. Kemudian verivolt yang telah terhubung dengan belitan motor BLDC akan menurunkan tegangan gelombang surja yang muncul. Gelombang surja yang terbentuk direkam menggunakan osiloskop Siglent SHS 1062. Data yang didapat berupa gelombang surja akan diolah melalui aplikasi DIAdem serta Microsoft Excel untuk

mengetahui nilai EAR-nya. Pengujian pada motor BLDC dilakukan secara *offline* atau motor BLDC dalam kondisi tidak beroperasi.



Gambar 3. 1 Blok diagram konfigurasi sistem tes surja



Gambar 3. 2 Konfigurasi peralatan

3.1.1 Pembangkit Tegangan Tinggi DC

Pada bagian pembangkit tegangan tinggi DC memiliki dua bagian utama, yaitu bagian autotrafo dan rangkaian *Walton Cockroft*. Autotrafo digunakan untuk mengatur tegangan *output* dari rangkaian *Walton Cockroft* agar sesuai dengan tegangan yang diinginkan. Rangkaian *Walton Cockroft* digunakan sebagai rangkaian pembangkit tegangan tinggi DC. *Output* dari bagian pembangkit tegangan tinggi DC diteruskan ke kapasitor tegangan tinggi yang terhubung dengan *switch*.

3.1.2 Switch

Bagian *switch* memiliki tiga komponen utama, yaitu *switch* 1 berupa *Reed Relay*, *switch* 2 berupa IGBT, serta Arduino sebagai kontroler.

Tabel 3. 1 Spesifikasi Reed Relay

Contact	Condition	Value
<i>Isolation across contact</i>	<i>DC or AC peak</i>	10 kV
<i>Maximum switching voltage</i>	<i>DC or AC peak</i>	7 kV
<i>Maximum switching current</i>	<i>DC or AC peak</i>	2 A
<i>Release time</i>	<i>Diode Fitted</i>	2ms

Tabel 3. 2 Spesifikasi IGBT

	Parameter	Max
V_{CES}	<i>Collector to Emitter Voltage</i>	1200 V
$I_C @ T_C = 25^0C$	<i>Continuous Collector Current</i>	105 A
$I_C @ T_C = 100^0C$	<i>Continuous Collector Current</i>	60 A
$I_F @ T_C = 25^0C$	<i>Diode Continuous Forward Current</i>	120 A
$I_F @ T_C = 100^0C$	<i>Diode Continuous Forward Current</i>	60 A
$V_{FM} @ I_C = 60 A$	<i>Diode Forward Voltage Drop</i>	2.20 V
$t_d (on)$	<i>Turn-On Delay Timer</i>	94 ns

3.1.3 Kapasitor Tegangan Tinggi

Kapasitor tegangan tinggi merupakan kapasitor surja yang digunakan sebagai media penyimpanan tegangan surja. Kapasitor ini akan mengalirkan tegangan ke lilitan motor BLDC pada saat *switch* penghubung dari kapasitor tegangan tinggi ke belitan motor BLDC beroperasi.

3.1.4 Motor BLDC

Motor BLDC yang digunakan adalah motor dengan skema belitan dengan spesifikasi ukuran kawat 0.8 mm^2 , paralel 16 kawat, serta memiliki 8 *turn* setiap fasa dengan nilai maksimum tegangan sebesar 5 kW. Belitan motor BLDC ini perlu di gulung (*taping*) secara manual untuk mengatur kondisi belitan agar dapat diuji dengan berbagai macam variable pengujian hubung singkat antar belitan. Setiap kondisi belitan yang ada diberi penanda berupa nomor-nomor pada setiap urutan belitan (tanda angka 1-8) untuk mempermudah pengujian tegangan inggi surja pada kondisi baik maupun rusak.

Dengan adanya penomoran maka variasi data yang dapat diuji akan lebih baik. Dimana kondisi yang diuji adalah hubung singkat antar belitan.

3.1.5 Osiloskop Siglent SHS 1062 dan Verivolt Entube DE-HB

Verivolt Entube DE-HB digunakan sebagai sensor tegangan, sedangkan osiloskop digunakan sebagai konverter dari *analog* ke *digital*. Peralatan tersebut digunakan untuk memantau gelombang surja dan mengkonversi data gelombang surja dari *analog* ke *digital* sehingga dapat dengan mudah untuk menganalisis.



Gambar 3. 3 (a) Siglent SHS 1062 (b) Verivolt Entube DE-HB

3.2 Perancangan Hardware

Penelitian pengujian tegangan surja meliputi desain dan perancangan rangkaian pembangkit tagangan tinggi DC, rangkaian *switching* tegangan tinggi untuk mengatur rangkaian kapasitor surja dan desain belitan motor BLDC.

3.2.1 Pembangkit Tegangan Tinggi DC

Perancangan pembangkit tegangan tinggi DC terdiri dari beberapa komponen yaitu sumber AC 220V, autrafo, *Walton Cockroft 4 stage*. *Input* dari sumber AC 220V diturunkan dengan menggunakan *autotrafo*. Sehingga *output* dari rangkaian *Walton Cockroft* akan bervariasi sesuai *input* yang diberikan dari *variable* transformator. Rangkaian *Walton Cockroft* didesain 4 *stage* dengan komponen 2 dioda dan 2 kapasitor pada setiap *stage*-nya. Pemilihan 4 *stage* bertujuan untuk memberikan *range* tegangan *output* yang lebih tinggi sehingga dapat digunakan pada pengujian tegangan surja dengan level tegangan yang tinggi.

Rangkaian *Walton Cockroft* memiliki perhitungan *output* seperti berikut:

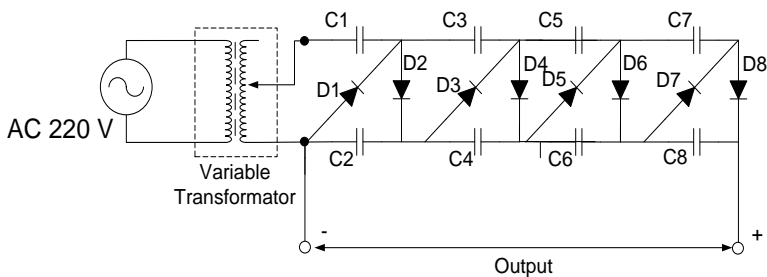
$$V_{out} = n \cdot \sqrt{2} \cdot V_{eff} \quad (3.1)$$

Dimana:

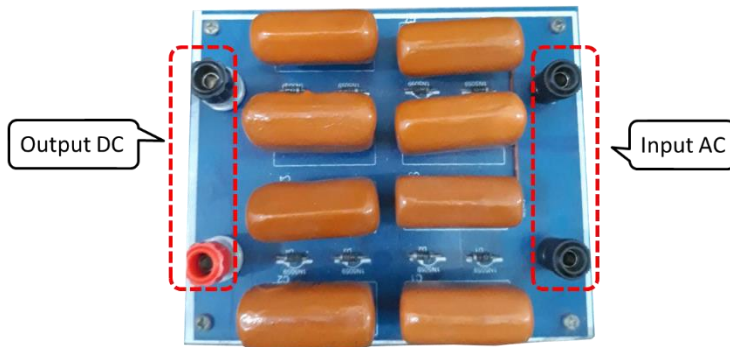
V_{out} : Tegangan *output* (V)

n : Jumlah *stage* (*max* 4 *stage*)

V_{eff} : Tegangan efektif *Input* AC (V)



Gambar 3. 4 Rangkaian Walton Cockroft 4 Stage



Gambar 3. 5 Rangkaian Walton Cockroft

Berdasarkan rumus 3.1 perhitungan rangkaian Walton cockroft terdapat pada tabel 3.3.

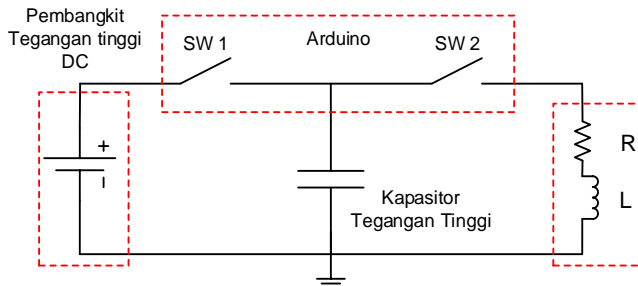
Tabel 3. 3 perhitungan *Walton cockroft*

Veff	Stage 1	Stage 2	Stage 3	Stage 4
0	0	0	0	0
40	56.56	113.13	169.70	226.27
80	113.13	226.27	339.41	452.54
120	169.70	339.41	509.11	678.82
160	226.27	452.54	678.82	905.09
200	282.84	565.68	848.52	1131.37
220	311.12	662.25	993.38	1244.5

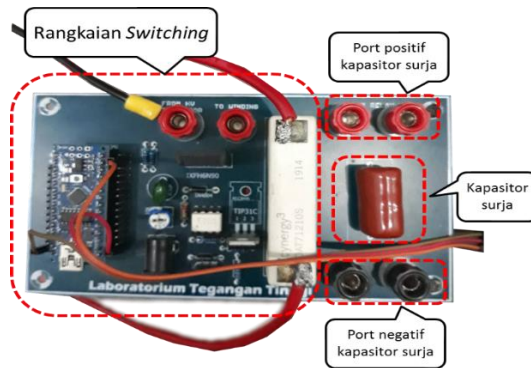
3.2.2 Perancangan Rangkaian *Switching*

Rangkaian *switching* digunakan sebagai saklar untuk mengisi (*charge*) dan mengeluarkan (*discharge*) muatan kapasitor tegangan tinggi. Rangkaian *switching* ini memiliki 2 buah switch yang diatur oleh PC melalui arduino seperti yang terlihat pada Gambar 3.2. *Switch* 1 digunakan untuk mengisi muatan kapasitor surja sedangkan *switch* 2 digunakan untuk melepas muatan kapasitor surja ke belitan motor BLDC.

Peran kapasitor surja sangat penting untuk pengujian ini. Kapasitor surja digunakan untuk membangkitkan tegangan surja dengan cara melepaskan muatan kapasitor ke belitan motor BLDC sehingga dapat diketahui respon gelombangnya.



Gambar 3. 6 Skema implementasi switch 1 dan switch 2



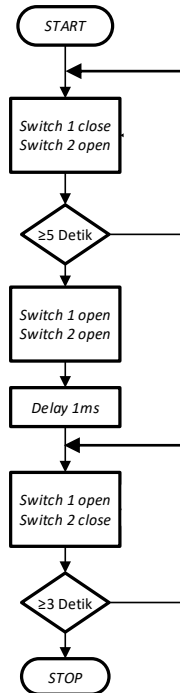
Gambar 3. 7 Rangkaian switching dan kapasitor surja

3.3 Perancangan Arduino

Arduino digunakan sebagai kontroler untuk *switch 1* dan *switch 2* agar tegangan surja dapat terbangkitkan dengan baik. Cara kerja dari Arduino adalah sebagai berikut:

1. Keadaan awal *Switch 1* dan *Switch 2* adalah *Normally Open*
2. Ketika Arduino mendapat sinyal dari PC, *Switch 1* *close* selama 5 detik sehingga kapasitor surja terisi muatan
3. Setelah 5 detik, *switch 1* *open*
4. Delay selama 1ms *Switch 2* *Close* selama 3 detik sehingga muatan pada kapasitor mengalir ke belitan

5. Setelah selesai, Arduino mengirimsinyal ke PC yang menyatakan program telah berjalan dengan benar.

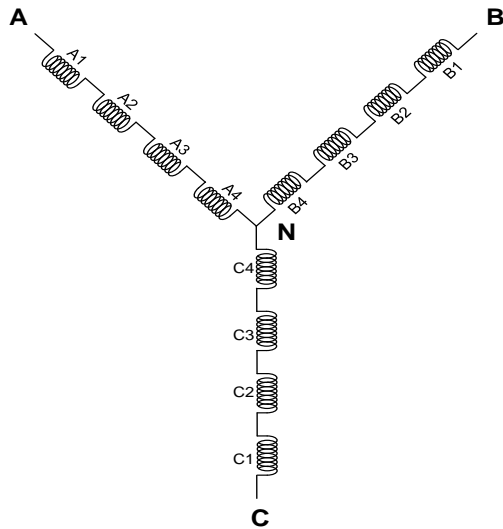


Gambar 3. 8 Flowchart Program Arduino

3.4 Perancangan Perangkat Motor BLDC

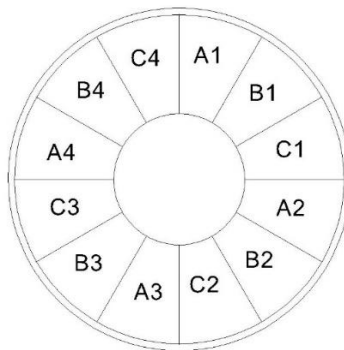
Motor BLDC yang digunakan untuk pengujian memiliki spesifikasi seperti berikut:

- Kawat 0.8 mm²
- Pararel 16 Kawat
- 8 *Turn* Per phasa
- Tegangan maksimum 5 kW



Gambar 3. 9 Konfigurasi Belitan Motor BLDC

Gambar 3.9



Gambar 3. 10 Skema belitan motor BLDC pada stator

Motor BLDC yang digunakan sebelumnya di atur terlebih dahulu pada saat penggulungan. Setiap fasa diberi tanda nomor 1-8 untuk tiap-tiap *turn* yang digulung. Sehingga terdapat penomoran pada masing-masing sisi motor BLDC. Penandaan menggunakan nomor ini akan mempermudah kombinasi dan variasi data hubung singkat anatar belitan sesuai kondisi yang ada. Pengujian dilakukan pada motor BLDC dalam keadaan normal. Data normal ini akan dijadikan sebagai gelombang referensi. Gelombang referensi adalah gelombang pembanding yang menunjukan apakah nilai motor BLDC dalam keadaan baik atau rusak.

Selanjutnya motor BLDC di uji dengan kondisi hubung singkat. Kondisi hubung singkat dapat diambil dengan cara mengupas lapisan isolasi kawat, kemudian ditambahkan kawat *extention* yang disambungkan pada terminal hubung singkat.

Setelah mengetahui data referensi dan *fault* pada beberapa bagian, maka dilakukan analisis menggunakan metode EAR. Dengan metode EAR, kita dapat melihat perbedaan motor BLDC pada saat normal dan pada saat *fault* dengan jelas.



Gambar 3. 11 Motor BLDC tes surja

3.5 Perancangan Skema Tes surja

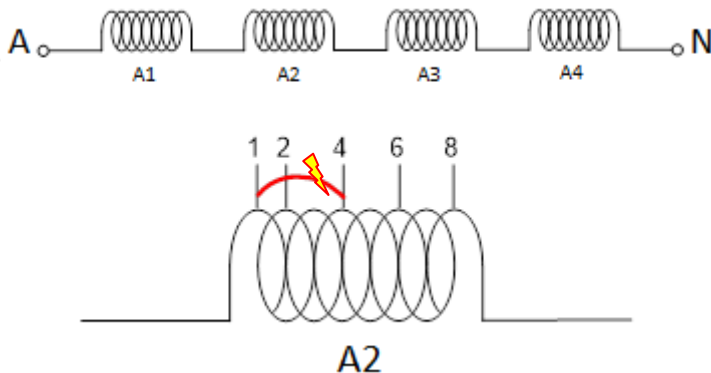
Pengujian tegangan surja yang dilakukan pada motor BLDC tidak dilakukan secara acak. Pengujian dilakukan dengan memberikan skema yang teratur sehingga hasil yang diperoleh valid dan dapat dipertanggung jawabkan. Skema yang disusun menunjukkan kondisi hubung singkat yang mungkin terjadi pada setiap fasa.

3.5.1 Pengujian Tes Surja dengan *Fault* Antar *Turn* Dalam Satu Fasa

Pengujian pertama yaitu dengan memberikan kondisi hubung singkat antar *Turn* yang dibuat pada beberapa bagian fasa, setiap fasa memiliki 4 bagian, dalam fasa A terdapat A1, A2, A3, dan A4. Begitu pula dengan fasa B dan C. Skema hubung singkat yang di uji mengikuti ketentuan sebagai berikut:

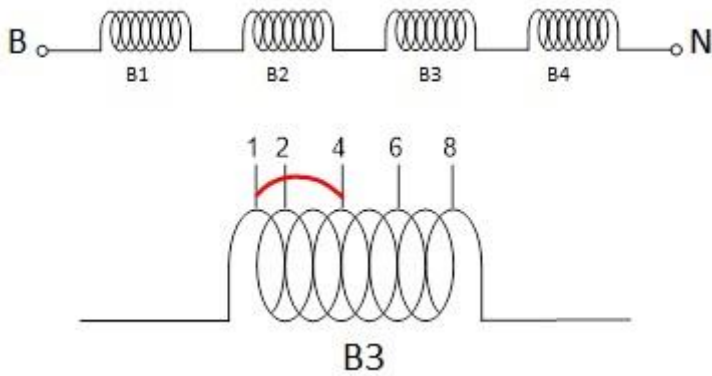
- Hubung singkat *Turn* 1 dengan *Turn* 2
- Hubung singkat *Turn* 1 dengan *Turn* 4
- Hubung singkat *Turn* 1 dengan *Turn* 6
- Hubung singkat *Turn* 1 dengan *Turn* 8

Pengujian dilakukan masing-masing 5 kali pada setiap skema pengujian, dengan tujuan untuk mendapatkan data yang lebih akurat. Berikut skema pengujian yang dilakukan pada fasa A.



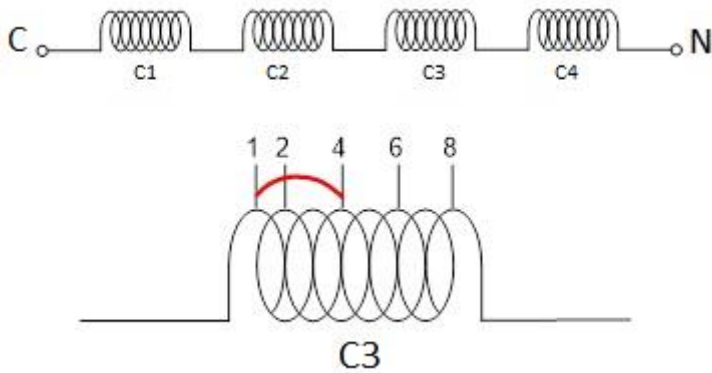
Gambar 3. 12 Skema tes surja dengan hubung singkat antar Turn A2

Pengujian fasa B



Gambar 3. 13 Skema tes surja dengan hubung singkat antar Turn B3

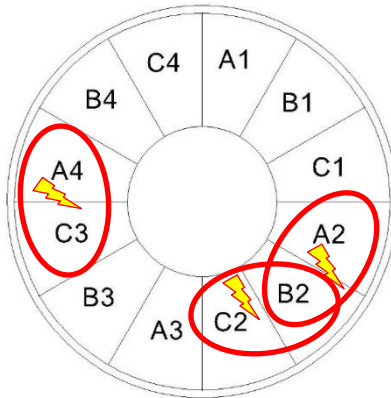
Pengujian fasa C



Gambar 3. 14 Skema tes surja dengan hubung singkat antar Turn C3

3.5.2 Pengujian Hubung Singkat Antar Fasa

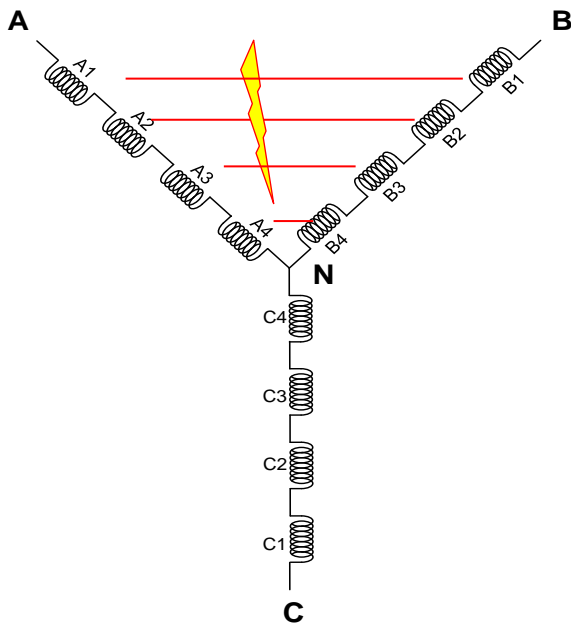
Pengujian hubung singkat antar fasa dilakukan pada kondisi fasa yang saling berdekatan, hubung singkat akan terjadi pada belitan-belitan yang saling bersinggungan. Sehingga untuk melakukan pengujian ini perlu diperhatikan skema perancangan motor BLDC. Pengujian dilakukan antar fasa yang berdekatan, seluruh fasa yang berdekatan di uji pada belitan ke 7, karena belitan ke 7 ada pada lokasi terluar tiap belitan sehingga rawan terkena hubung singkat dengan belitan pada fasa sebelahnya. A1-B1, B1-C1, C1-A2, st. samapi dengan C4-A1.



Gambar 3. 15 Skema tes surja antar fasa

Skema hubung singkat yang di uji mengikuti ketentuan sebagai berikut.

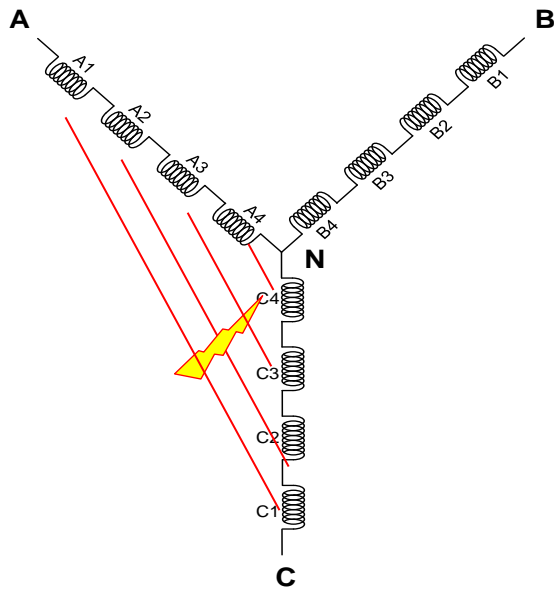
Pengujian fasa A-B



Gambar 3. 16 Skema tes surja fasa A-B

- Hubung singkat pada A1 *turn* 7 – B1 *turn* 7
- Hubung singkat pada A2 *turn* 7 - B2 *turn* 7
- Hubung singkat pada A3 *turn* 7 – B3 *turn* 7
- Hubung singkat pada A4 *turn* 7 – B4 *turn* 7

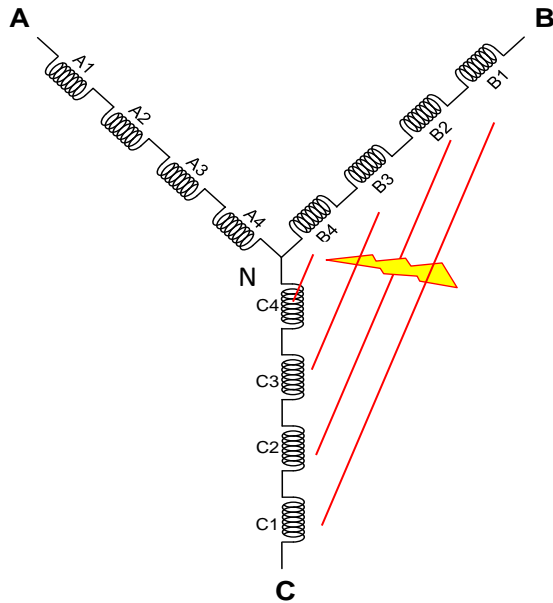
Pengujian fasa A-C



Gambar 3. 17 Skema tes surja fasa A-C

- Hubung singkat pada A1 *turn* 7 – C4 *turn* 7
- Hubung singkat pada A2 *turn* 7 – C1 *turn* 7
- Hubung singkat pada A3 *turn* 7 – C2 *turn* 7
- Hubung singkat pada A4 *turn* 7 – C3 *turn* 7

Pengujian fasa B-C



Gambar 3. 18 Skema tes surja fasa B-C

- Hubung singkat pada B1 *turn* 7 – C1 *turn* 7
- Hubung singkat pada B2 *turn* 7 – C2 *turn* 7
- Hubung singkat pada B3 *turn* 7 – C3 *turn* 7
- Hubung singkat pada B4 *turn* 7 – C4 *turn* 7

BAB 4

HASIL DAN ANALISIS

4.1 Hasil dan Analisis Pengujian Rangkaian *Walton Cockroft*

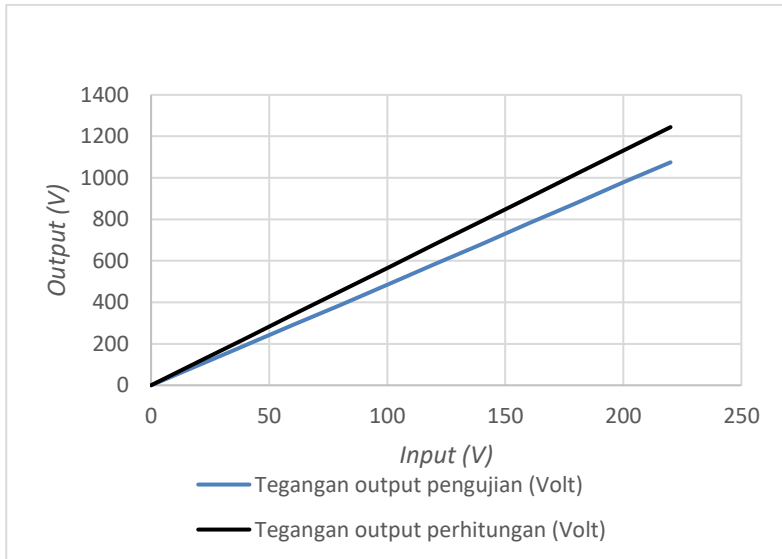
Pengujian rangkaian *Walton Cockroft* menggunakan tegangan rating PLN 220V yang dihubungkan ke autotrafo sebagai sumber AC. Tegangan dari autotrafo diubah secara bertahap dari 0V hingga 220V sesuai desain perhitungan yang dibuat pada bab sebelumnya. Autotrafo memiliki fungsi utama sebagai kontrol tegangan *output* yang dihasilkan oleh rangkaian *Walton Cockroft* agar sesuai dengan tegangan yang kita inginkan. Peralatan yang digunakan dalam pengujian rangkaian *Walton Cockroft* meliputi AC Voltmeter dan DC voltmeter AC voltmeter digunakan untuk mengukur tegangan *output* dari *variable* transformator. Sedangkan DC Voltmeter digunakan untuk mengukur tegangan *output* dari rangkaian *Walton Cockroft*.

Tegangan *output* dari autotrafo dinaikkan secara bertahap dari 0V, 20V, 40V, dan seterusnya hingga 220V. Tegangan *output* dari rangkaian *Walton Cockroft* juga diukur beriringan dengan level tegangan yang terus dinaikkan. Hasil pengukuran tegangan DC dari *output* rangkaian *Walton Cockroft* dibandingkan dengan perhitungan yang telah dilakukan pada bab sebelumnya.

Tabel 4. 1 Hasil pengujian dan perhitungan rangkaian *Walton Cockroft*

Tegangan <i>Input</i> AC (Volt)	Tegangan <i>output</i> pengujian (Volt)	Tegangan <i>output</i> perhitungan (Volt)
0	0	0
20	95.9	113.13
40	192.6	226.27
60	291.0	339.41
80	386.7	452.54
100	485.2	565.68
120	584.2	678.82
140	680.6	791.95
160	781.2	905.09
180	877.5	1018.23
200	978.2	1131.37
220	1074.8	1244.5

Dari hasil pengujian dapat dilihat bahwa terdapat selisih (*error*) dari hasil perhitungan dengan hasil pengukuran. Hal ini terjadi karena beberapa faktor seperti rugi-rugi komponen maupun *ripple* tegangan yang dihasilkan dari rangkaian *Walton Cockroft*. Perbandingan *output* teangan dapat dilihat pada gambar 4.1.



Gambar 4. 1 Grafik perbandingan output pengujian dengan perhitungan

4.2 Hasil dan Analisis Pengujian *Rise time* Gelombang Surja

Pada pengujian awal ini memiliki tujuan untuk mengetahui nilai *rise time* dari gelombang surja yang terbentuk. Pengujian *rise time* dilakukan dengan menggunakan standar tegangan tes surja dengan melihat standar IEEE 522 pada bagian *rise time* tegangan surja. Pengujian *rise time* dilakukan untuk menentukan tegangan uji yang digunakan nantinya agar sesuai dengan standar. *Rise time* yang didapatkan dari hasil pengujian tersebut yaitu antara 1.2 μ s sehingga berdasarkan standar IEEE 522 tegangan uji yang digunakan yaitu sebesar 3.5 pu. Tetapi, dalam rekomendasi *Baker Instrument* disebutkan bahwa dalam hukum *Paschen*

direkomendasikan tegangan minimal agar dapat melompat ke sela udara minimal 500 V. Artinya, tegangan perhitungan pada standar IEEE 522 belum mencukupi sehingga harus digunakan standar lain. Dari baker juga telah merekomendasikan menggunakan tegangan maksimum untuk tes surja dari standar EASA yakni sebesar:

$$V_{max} = (2 \times V_L) + 1000 \quad (4.1)$$

Sehingga nilai yang didapatkan adalah 1400V. Namun, dikarenakan keterbatasan rating peralatan *switching* yaitu pada komponen IGBT yang hanya memiliki tegangan maksimal 1200V, maka tegangan yang diatur untuk pengujian hanya mencapai batas maksimal 1000V untuk keamanan peralatan *switching*.

4.3 Hasil dan Analisis Pengujian Nilai Resistansi dan Induktansi

Pengujian nilai resistansi (R) dan induktansi (L) bertujuan untuk mengetahui nilai R dan L pada belitan serta pengaruhnya pada frekuensi isolasi yang terbentuk akibat gelombang surja. Berdasarkan teori, jika terjadi hubung singkat, maka nilai R dan L pada belitan akan menjadi lebih kecil sehingga frekuensi tegangan surja yang terbangkitkan akan semakin besar. Berkut nilai R dan L pada belitan motor BLDC yang diambil dengan menggunakan LCR meter dapat dilihat pada table 4.2.

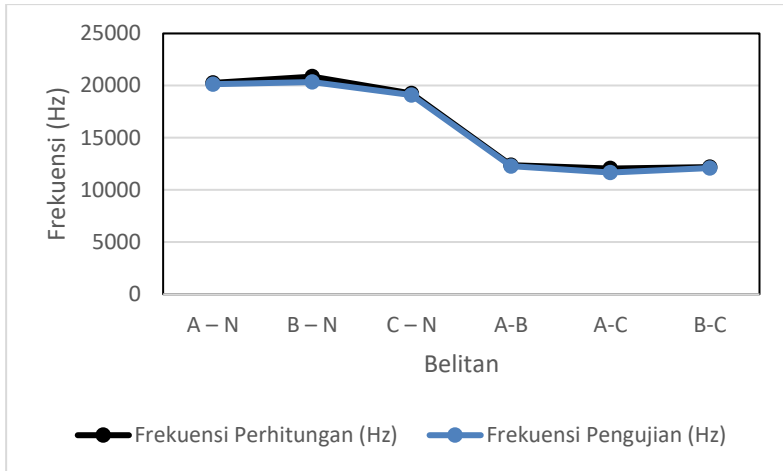
Dari persamaan 2.3 maka dapat dihitung frekuensi osilasi yang terbangkitkan dari gelombang surja. Kemudian frekuensi dari hasil tes surja dibandingkan dengan frekuensi pada kondisi normal. Frekuensi surja dapat didapat dengan melihat panjang 1 gelombang awal kemudian dihitung dengan rumus $f = 1/T$ dengan T adalah panjang 1 periode gelombang awal surja. Hasil perbandingan pengujian dan perhitungan nilai frekuensi dapat dilihat pada tabel 4.3. Hasil pengujian menunjukkan perbandingan nilai dari data pengujian tidak jauh berbeda dengan perhitungan. Nilai eror yang dihasilkan cukup kecil membuktikan rumus yang digunakan hampir sesuai dengan hasil pengujian.

Tabel 4. 2 Nilai Resistansi dan Induktansi motor BLDC

Belitan	Resistansi	Induktansi
A – N	0.07 Ω	90.8 μH
B – N	0.06 Ω	85.7 μH
C – N	0.12 Ω	100.5 μH
AB	0.15 Ω	243.8 μH
AC	0.23 Ω	256.7 μH
BC	0.22 Ω	250.4 μH

Tabel 4. 3 Perbandingan Nilai Frekuensi Perhitungan dan Pengujian

Belitan	Frekuensi Perhitungan (Hz)	Frekuensi Pengujian (Hz)
A – N	20264.83	20128.82
B – N	20859.47	20341.74
C – N	19262.06	19083.96
AB	12367.11	12285.01
AC	12052.38	11668.61
BC	12203.06	12091.89

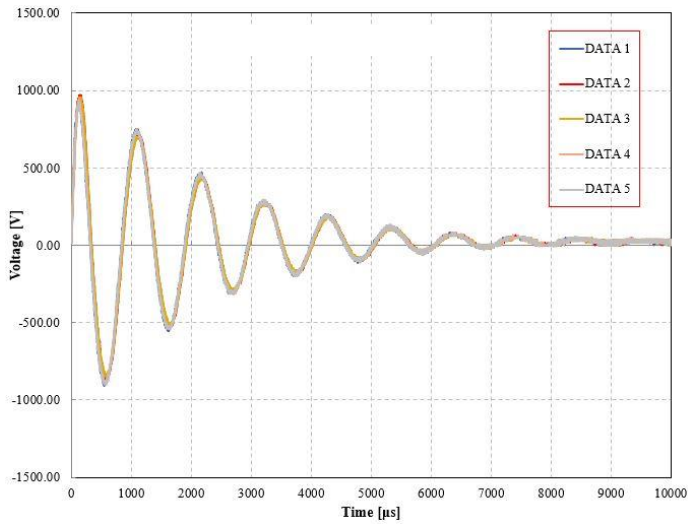


Gambar 4. 2 Perbandingan frekuensi perhitungan dan pengujian

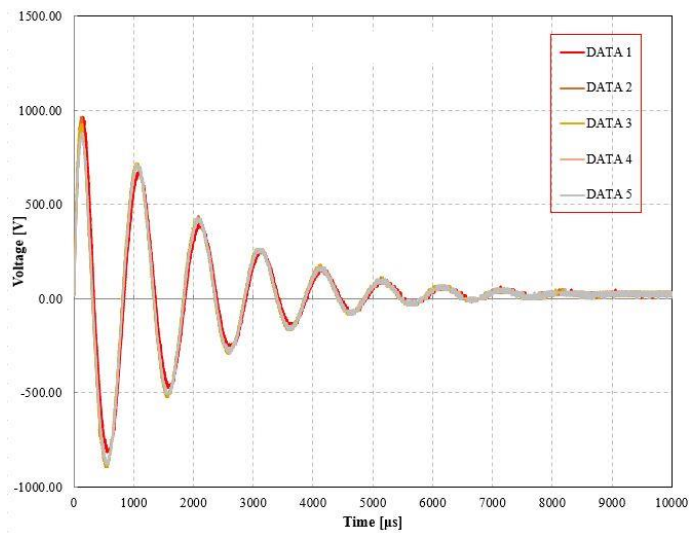
4.4 Hasil dan Analisis Tes surja Pada Motor BLDC Normal

Tes surja dilakukan pada motor BLDC sesuai dengan skema yang dibuat pada bab 3. Tes surja pada motor BLDC dengan kondisi normal untuk digunakan sebagai nilai referensi. Nilai referensi ini yang kemudian dibandingkan dengan kondisi saat motor mengalami kondisi hubung singkat. Sehingga dapat menjadi acuan (*threshold*) untuk diagnosis kerusakan motor BLDC dengan menggunakan tes surja.

Pengujian dilakukan 5 kali dengan kondisi motor BLDC normal. Setelah itu dicari nilai EAR diantara kelima gelombang dengan menggunakan rumus 2.4, kemudian kita cari rata-rata nilai EAR nya. Nilai tersebut dibuat sebagai acuan nilai EAR disaat motor BLDC dalam kondisi normal. Berikut hasil pengambilan data yang telah dilakukan.



Gambar 4. 3 Gelombang surja fasa A-N kondisi normal



Gambar 4. 4 Gelombang surja fasa A-B kondisi normal

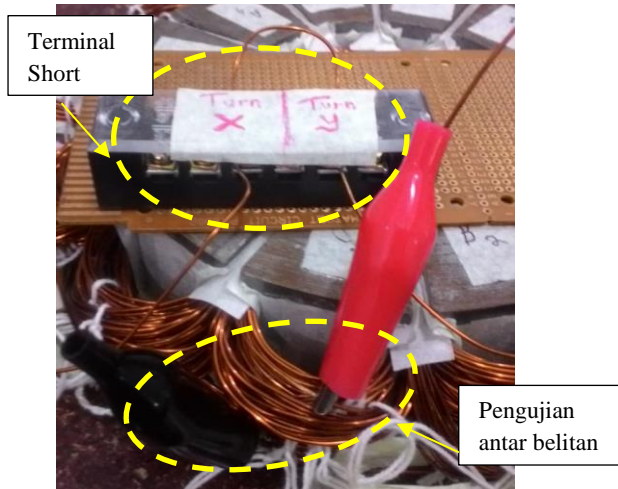
Tabel 4. 4 Hasil pengujian test-reff EAR Motor BLDC kondisi Normal

FASA	MIN (%)	AVRG (%)	MAX (%)
A-N	2.50	5.14	7.10
B-N	0.14	3.91	9.87
C-N	3.00	5.35	8.20
AB	4.29	7.53	10.61
AC	2.51	5.14	7.10
BC	2.69	6.25	9.98

Dari tabel 4.4 dapat dilihat bahwa pada keadaan normal, *threshold* dari nilai EAR pada belitan motor BLDC berada dalam range 3.91%-7.51%. Jika kita lakukan pengujian pada belitan motor BLDC dengan skema hubung singkatnya, maka kondisi motor BLDC dikatakan rusak apabila nilai EAR yang didapatkan diatas nilai *threshold* pada table 4.4. Namun, menurut Baker Instrument nilai *threshold* untuk *Test-reff* EAR pada motor dalam kondisi normal berkisar 10% . Jika lebih dari 10%, maka motor dapat didiagnosis terdapat gangguan. Karakteristik gelombang yang didapatkan padapengujian motor kondisi normal ini kemudian akan menjadi gelombang referensi. Gelombang referensi ini digunakan sebagai dasar perbandingan terhadap karakteristik gelombang lain selama pengujian dengan berbagai variasi hubung singkat.

4.5 Hasil dan Analisis Tes Surja Motor BLDC Dengan Hubung Singkat Antar Belitan Dalam Satu Fasa

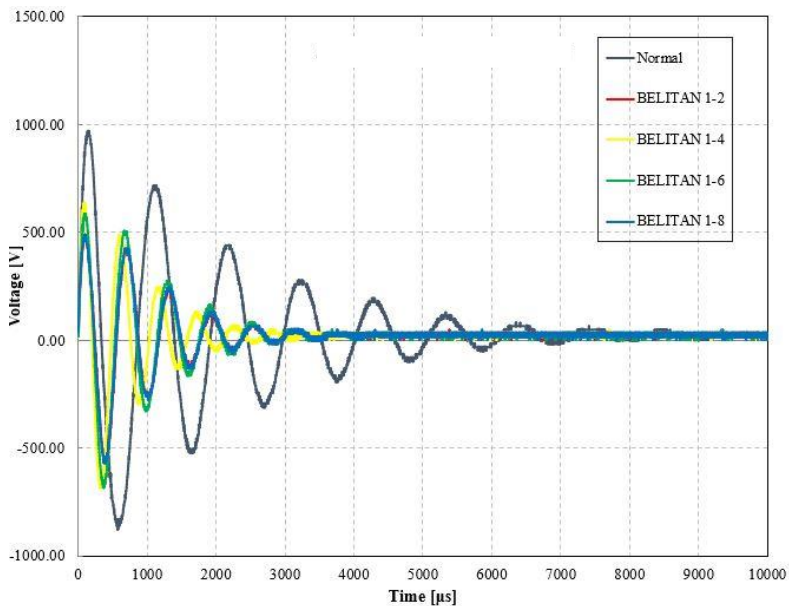
Tes surja pada motor BLDC dengan kondisi hubung singkat antar belitan dalam satu fasa dilakukan sesuai dengan skema yang dijelaskan pada bab 3. Pengujian dilakukan dengan pengulangan sebanyak 5 kali tiap kondisi hubung singkat sehingga dapat memberikan data yang akurat. Analisis yang digunakan adalah *Test-reff* EAR dengan aplikasi rumus 2.4.



Gambar 4. 5 Tes surja dalam satu fasa A

4.5.1 Hubung Singkat Antar Belitan Pada Fasa A

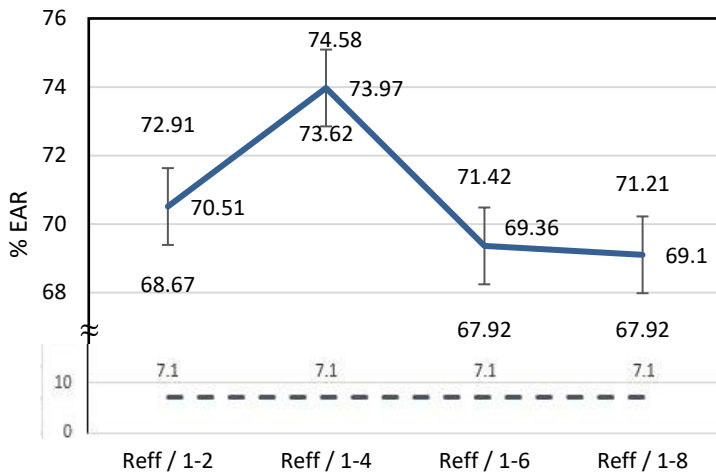
Pengujian dilakukan dengan skema hubung singkat pada belitan 1 dengan belitan 2, belitan 1 dengan belitan 4, belitan 1 dengan belitan 6, dan belitan 1 dengan belitan 8. Berikut hasil pengujian yang telah dilakukan. Pengujian ini bertujuan untuk mendapatkan karakteristik gelombang ketika diberikan kondisi hubung singkat dengan skema tersebut. Respon gelombang hasil pengujian yang didapatkan selanjutnya dibandingkan dengan gelombang pada saat motor dalam keadaan normal sebagai nilai referensinya. Perbandingan respon gelombang hubung singkat dengan gelombang referensi dalam pengujian yang telah dilakukan dapat dilihat pada gambar 4.6



Gambar 4. 6 Perbandingan gelombang referensi dan hubung singkat fasa A-N

Tabel 4. 5 Hasil Test-reff EAR pengujian fasa A-N

Hubung singkat	<i>Test-reff</i> EAR			
	Fasa A-N			
	Normal	Min	Avg	Max
Reff / 1-2	7.10	68.67	70.51	72.91
Reff / 1-4	7.10	73.62	73.97	74.58
Reff / 1-6	7.10	67.92	69.36	71.42
Reff / 1-8	7.10	67.92	69.10	71.21

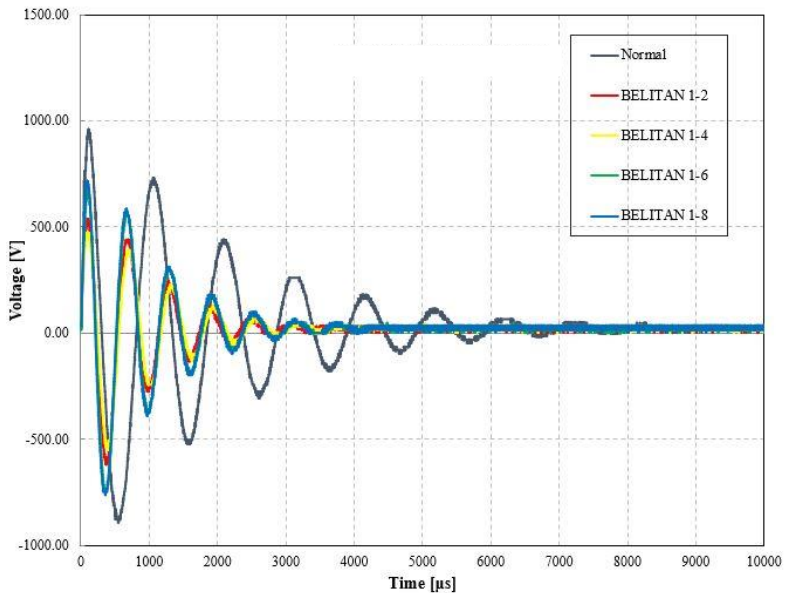


Gambar 4. 7 Grafik perbandingan %EAR fasa A-N

Dari data diatas dapat kita lihat bahwa tren dari perbandingan nilai *Test-reff* EAR memiliki nilai yang varaitif berdasarkan hubung singkat degan tempat yang terjadi. Disini dapat kita lihat bahwa ukuran gelombang kondisi hubung singkat lebih kecil, sehingga dari perbedaan area referensi dan hubung dingkat dapat kita ambil nilai EAR yang semakin besar akibat perbedaan area yang juga semakin besar. Nilai rata-rata dari *Test-reff* EAR pada hubung singkat fasa A-N berada diatas standar baker 10%.

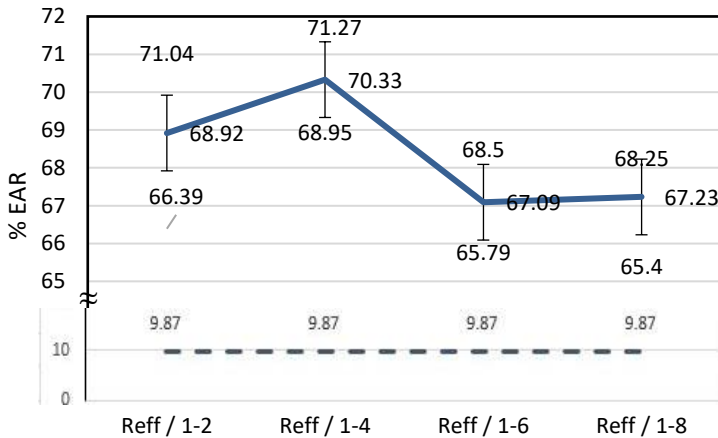
4.5.2 Hubung Singkat Antar Belitan Pada Fasa B

Pengujian dilakukan dengan skema hubung singkat pada belitan 1 dengan belitan 2, belitan 1 dengan belitan 4, belitan 1 dengan belitan 6, dan belitan 1 dengan belitan 8. Berikut hasil pengujian yang telah dilakukan. Berikut hasil pengujian yang telah dilakukan. Pengujian ini bertujuan untuk mendapatkan karakteristik gelombang ketika diberikan kondisi hubung singkat dengan skema tersebut. Respon gelombang hasil pengujian yang didapatkan selanjutnya dibandingkan dengan gelombang pada saat motor dalam keadaan normal sebagai nilai referensinya. Perbandingan respon gelombang hubung singkat dengan gelombang referensi dalam pengujian yang telah dilakukan dapat dilihat pada gambar 4.8



Gambar 4. 8 Perbandingan gelombang referensi dan hubung singkat fasa B-N

Tabel 4. 6 Hasil Test-reff EAR pengujian fasa B-N				
Hubung singkat	<i>Test-reff</i> EAR			
	Fasa B-N			
	Normal (%)	Min (%)	Avg (%)	Max (%)
Reff / 1-2	9.87	69.06	70.43	72.40
Reff / 1-4	9.87	69.55	70.12	71.10
Reff / 1-6	9.87	68.32	70.06	71.81
Reff / 1-8	9.87	67.93	68.73	69.33

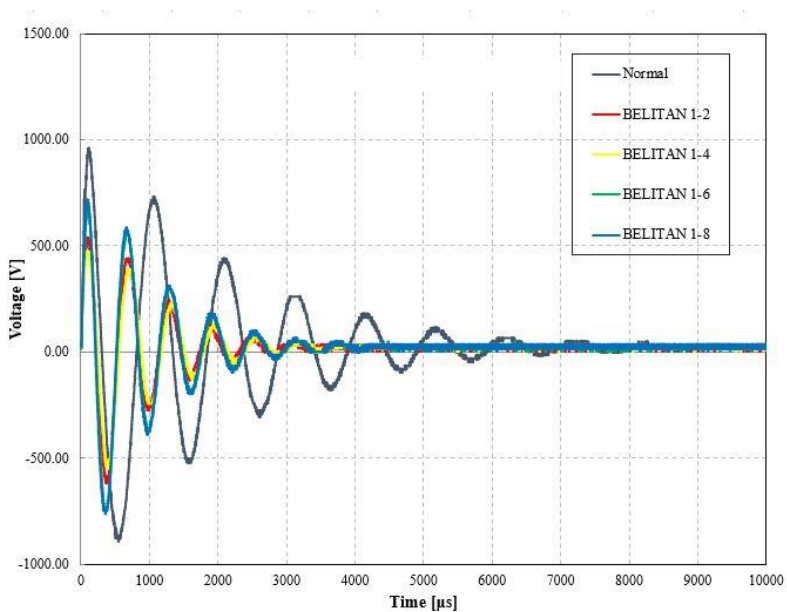


Gambar 4. 9 Grafik perbandingan % EAR fasa B-N

Dari data diatas dapat kita lihat bahwa tren dari perbandingan nilai *Test-reff* EAR memiliki nilai yang varaitif berdasarkan hubung singkat degan tempat yang terjadi. Disini dapat kita lihat bahwa ukuran gelombang kondisi hubung singkat lebih kecil, sehingga dari perbedaan area referensi dan hubung dingkat dapat kita ambil nilai EAR yang semakin besar akibat perbedaan area yang juga semakin besar. Nilai rata-rata dari *Test-reff* EAR pada hubung singkat fasa B-N berada diatas standar baker 10%.

4.5.3 Hubung Singkat Antar Belitan Pada Fasa C

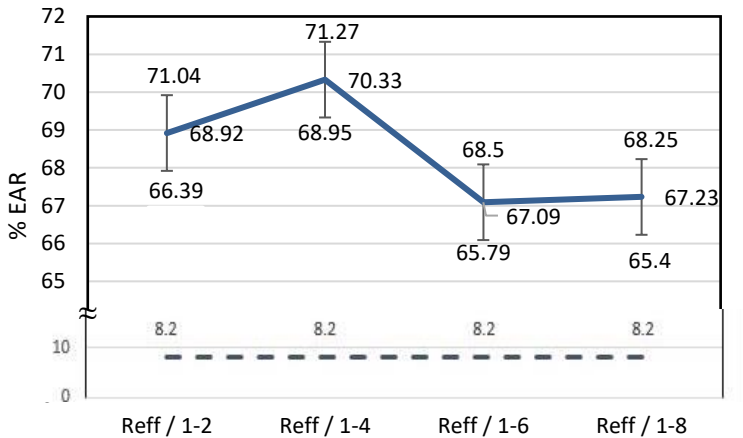
Pengujian dilakukan dengan skema hubung singkat pada belitan 1 dengan belitan 2, belitan 1 dengan belitan 4, belitan 1 dengan belitan 6, dan belitan 1 dengan belitan 8. Berikut hasil pengujian yang telah dilakukan. Berikut hasil pengujian yang telah dilakukan. Pengujian ini bertujuan untuk mendapatkan karakteristik gelombang ketika diberikan kondisi hubung singkat dengan skema tersebut. Respon gelombang hasil pengujian yang didapatkan selanjutnya dibandingkan dengan gelombang pada saat motor dalam keadaan normal sebagai nilai referensinya. Perbandingan respon gelombang hubung singkat dengan gelombang referensi dalam pengujian yang telah dilakukan dapat dilihat pada gambar 4.10



Gambar 4. 10 Perbandingan gelombang referensi dan hubung singkat fasa C-N

Tabel 4. 7 Hasil Test-reff EAR tes surja fasa C-N

<i>Fault</i>	<i>Test-reff EAR</i>			
	Fasa C-N			
	Normal	Min	Avg	Max
Reff / 1-2	8.20	66.39	68.92	71.04
Reff / 1-4	8.20	68.95	70.33	71.27
Reff / 1-6	8.20	65.79	67.09	68.50
Reff / 1-8	8.20	65.40	67.23	68.25



Gambar 4. 11 Grafik perbandingan %EAR C-N

Dari data diatas dapat kita lihat bahwa tren dari perbandingan nilai *Test-reff* EAR memiliki nilai yang varaitif berdasarkan hubung singkat degan tempat yang terjadi. Disini dapat kita lihat bahwa ukuran gelombang kondisi hubung singkat lebih kecil, sehingga dari perbedaan area referensi dan hubung dingkat dapat kita ambil nilai EAR yang semakin besar akibat perbedaan area yang juga semakin besar. Nilai rata-rata dari *Test-reff* EAR pada hubung singkat fasa C-N berada diatas standar baker 10%.

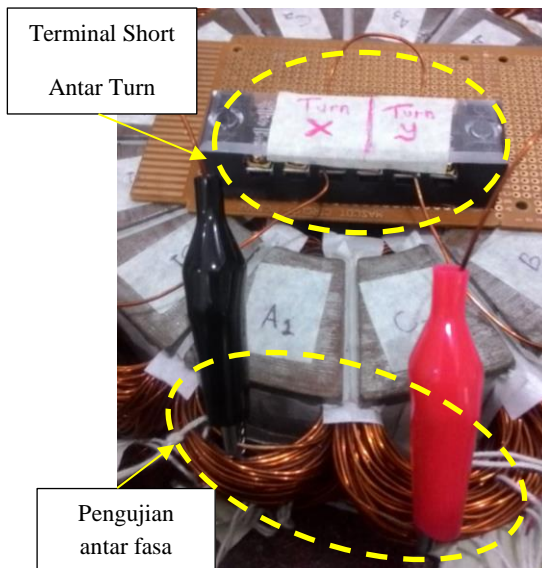
Berdasarkan data EAR pada fasa A, B, dan C. Nilai EAR yang didapatkan sangat besar. Lokasi hubung singkat menunjukan tren yang menurun walaupun relative kecil. Dimana semakin jauh posisi belitan, nilai EAR juga menjadi semakin kecil.

4.6 Hasil dan Analisis Tes surja Hubung singkat Antar Belitan Pada Fasa Yang Berbeda

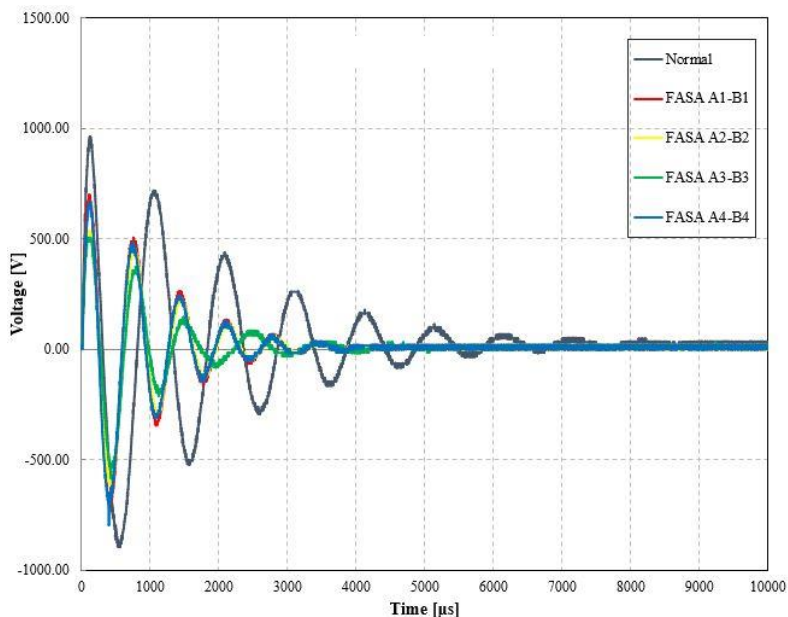
Tes surja pada motor BLDC dengan kondisi hubung singkat antar belitan dalam satu fasa dilakukan sesuai dengan skema yang dijelaskan pada bab 3. Pengujian dilakukan dengan pengulangan sebanyak 5 kali tiap kondisi hubung singkat sehingga dapat memberikan data yang akurat. Analisis yang digunakan adalah *Test-reff* EAR dengan aplikasi rumus 2.4.

3.6.1 Pengujian Pada Fasa A-B

Pengujian hubung singkat antar fasa dilakukan pada kondisi fasa yang saling berdekatan, hubung singkat akan terjadi pada belitan-belitan yang saling bersinggungan. Sehingga untuk melakukan pengujian ini perlu diperhatikan skema perancangan motor BLDC. Pengujian dilakukan pada fasa yang lokasinya saling berdekatan, seluruh fasa yang berdekatan di uji pada belitan ke 7, karena pada konstruksi belitan motor BLDC, belitan ke 7 ada pada lokasi terluar antar belitan sehingga lebih mudah terjadi hubung singkat antar belitan dengan fasa bagian sebelahnya.



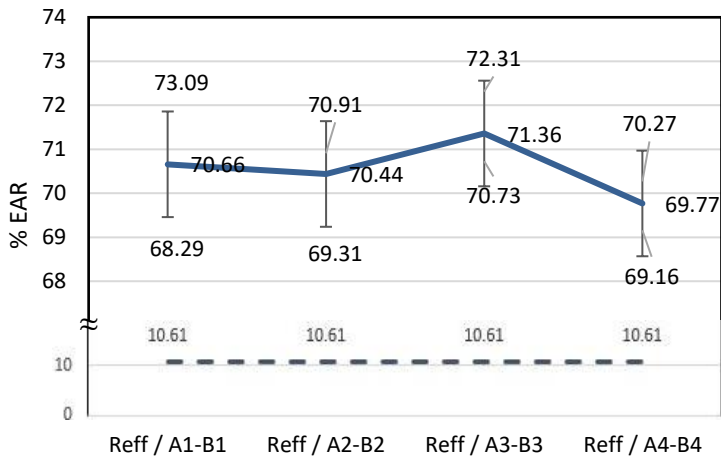
Gambar 4. 12 Tes surja dengan fault antar Turn



Gambar 4. 13 Perbandingan gelombang Referensi dengan hubung singkat fasa A-B

Tabel 4. 8 Hasil analisis tes surja antar fasa pada belitan 7

<i>Fault</i>	<i>Test-reff</i> EAR			
	Fasa A-B			
	Normal	Min	Avg	Max
Reff / A1-B1	10.61	68.29	70.66	73.09
Reff / A2-B2	10.61	69.31	70.44	70.91
Reff / A3-B3	10.61	70.73	71.36	72.31
Reff / A4-B4	10.61	69.16	69.77	70.27

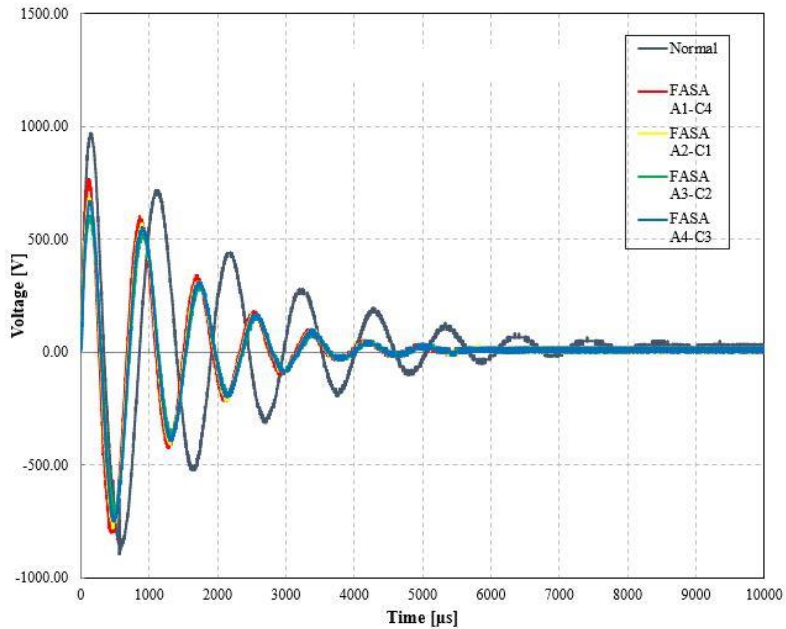


Gambar 4. 14 Grafik perbandingan %EAR A-B

Dari hasil pengujian pada fasa A-B diatas dapat kita lihat bahwa tren dari nilai perbandingan EAR memiliki nilai yang variatif. Nilai EAR Disini dapat kita lihat bahwa ukuran gelombang kondisi hubung singkat lebih kecil, sehingga dari perbedaan area referensi dan hubung dingkat dapat kita ambil nilai EAR yang semakin besar akibat perbedaan area yang juga semakin besar. Nilai rata-rata dari *Test-reff* EAR pada hubung singkat fasa A-N berada diatas standar baker 10%.

3.6.2 Pengujian Pada Fasa A-C

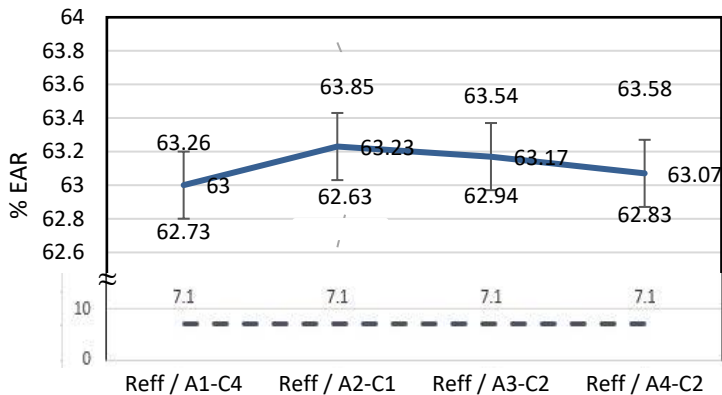
Pengujian hubung singkat antar fasa dilakukan pada kondisi fasa yang saling berdekatan, hubung singkat akan terjadi pada belitan-belitan yang saling bersinggungan. Sehingga untuk melakukan pengujian ini perlu diperhatikan skema perancangan motor BLDC. Pengujian dilakukan pada fasa yang lokasinya saling berdekatan, seluruh fasa yang berdekatan di uji pada belitan ke 7, karena pada konstruksi belitan motor BLDC, belitan ke 7 ada pada lokasi terluar antar belitan sehingga lebih mudah terjadi hubung singkat antar belitan dengan fasa bagian sebelahnya.



Gambar 4. 15 Perbandingan gelombang Referensi degan hubung singkat A-C

Tabel 4. 9 Hasil analisis tes surja antar fasa pada belitan 7

<i>Fault</i>	<i>Test-ref EAR</i>			
	Fasa A-B			
	Normal	Min	Avg	Max
Reff / A1-C4	7.10	62.73	63.00	63.26
Reff / A2-C1	7.10	62.63	63.23	63.85
Reff / A3-C2	7.10	62.94	63.17	63.54
Reff / A4-C2	7.10	62.83	63.07	63.58

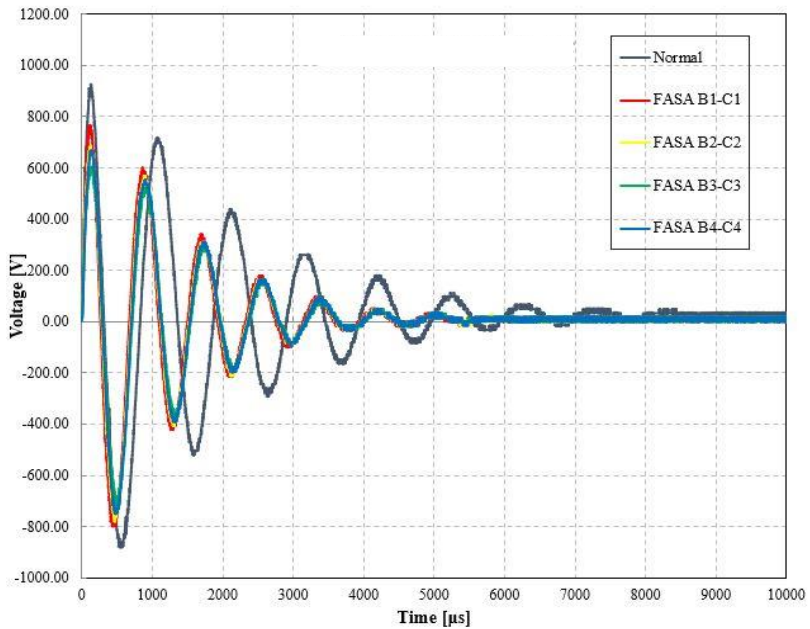


Gambar 4. 16 Grafik perbandingan EAR Fasa A-C

Dari hasil pengujian pada fasa A-B diatas dapat kita lihat bahwa tren dari nilai perbandingan EAR memiliki nilai yang variatif. Nilai EAR Disini dapat kita lihat bahwa ukuran gelombang kondisi hubung singkat lebih kecil, sehingga dari perbedaan area referensi dan hubung dingkat dapat kita ambil nilai EAR yang semakin besar akibat perbedaan area yang juga semakin besar. Nilai rata-rata dari *Test-reff* EAR pada hubung singkat fasa A-N berada diatas standar baker 10%.

4.6.3 Pengujian Pada Fasa B-C

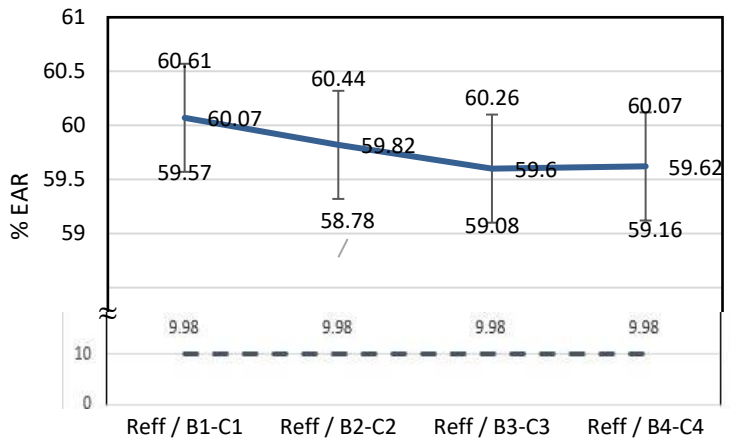
Pengujian hubung singkat antar fasa dilakukan pada kondisi fasa yang saling berdekatan, hubung singkat akan terjadi pada belitan-belitan yang saling bersinggungan. Sehingga untuk melakukan pengujian ini perlu diperhatikan skema perancangan motor BLDC. Pengujian dilakukan pada fasa yang lokasinya saling berdekatan, seluruh fasa yang berdekatan di uji pada belitan ke 7, karena pada konstruksi belitan motor BLDC, belitan ke 7 ada pada lokasi terluar antar belitan sehingga lebih mudah terjadi hubung singkat antar belitan dengan fasa bagian sebelahnya.



Gambar 4. 17 Perbandingan gelombang Referensi degan hubung singkat B-C

Tabel 4. 10 Hasil analisis tes surja antar fasa pada belitan 7

<i>Fault</i>	<i>Test-reff</i> EAR			
	Fasa A-B			
	Normal	Min	Avg	Max
Reff / B1-C1	9.98	59.57	60.07	60.61
Reff / B2-C2	9.98	58.78	59.82	60.44
Reff / B3-C3	9.98	59.08	59.60	60.26
Reff / B4-C4	9.98	59.16	59.62	60.07



Gambar 4. 18 Grafik perbandingan EAR Fasa B-C

Dari hasil pengujian pada fasa A-B diatas dapat kita lihat bahwa tren dari nilai perbandingan EAR memiliki nilai yang variatif. Nilai EAR Disini dapat kita lihat bahwa ukuran gelombang kondisi hubung singkat lebih kecil, sehingga dari perbedaan area referensi dan hubung dingkat dapat kita ambil nilai EAR yang semakin besar akibat perbedaan area yang juga semakin besar. Nilai rata-rata dari *Test-reff* EAR pada hubung singkat fasa A-N berada diatas standar baker 10%.

4.7 Data *Threshold* Hasil Pengujian

Dari data pengujian yang dilakukan, didapatkan nilai *threshold* yang ada. Berikut adalah rangkuman data yang didapatkan:

Tabel 4. 11 Nilai Threshold Belitan Normal

Kriteria <i>fault</i>	Nilai <i>threshold</i> EAR (%)	
Normal Coil	Rekomendasi Baker	Max
<i>Test-reff</i> EAR Phase A-N Normal	10	7.10
<i>Test-reff</i> EAR Phase B-N Normal	10	9.87
<i>Test-reff</i> EAR Phase C-N Normal	10	8.20
<i>Test-reff</i> EAR Phase A-B Normal	15	10.61
<i>Test-reff</i> EAR Phase A-C Normal	15	7.10
<i>Test-reff</i> EAR Phase B-C Normal	15	9.98

Tabel 4. 12 Nilai Threshold Hubung Singkat

Kriteria <i>fault</i>	Nilai <i>threshold</i> EAR (%)				
<i>Fault</i>	Rekomendasi Baker	Normal	Min	Avg	Max
<i>Test-reff</i> EAR Phase A-N Fault	10	7.10	68.67	70.51	72.91
<i>Test-reff</i> EAR Phase B-N Fault	10	9.87	69.06	70.43	72.40
<i>Test-reff</i> EAR Phase C-N Fault	10	8.20	66.39	68.92	71.04
<i>Test-reff</i> EAR Phase A-B Fault	15	10.61	68.29	70.66	73.09
<i>Test-reff</i> EAR Phase A-C Fault	15	7.10	62.73	63.00	63.26
<i>Test-reff</i> EAR Phase B-C Fault	15	9.98	59.57	60.07	60.61

Berdasarkan data pengujian yang telah dilakukan, nilai *threshold* dari kondisi gangguan dapat disusun sehingga menjadi sebuah data yang digunakan sebagai acuan untuk mendiagnosis saat melakukan tes surja pada motor BLDC.

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan pada tugas akhir kali ini dapat ditarik beberapa kesimpulan. Berikut kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini:

1. Hasil uji tegangan surja pada motor BLDC untuk mendeteksi hubung singkat dapat dianalisis dengan menggunakan metode *Error Area Ratio* (EAR).
2. Nilai induktansi dan resistansi belitan mempengaruhi frekuensi gelombang surja yang terjadi pada belitan.
3. Pada saat terjadi hubung singkat pada belitan motor, maka respon gelombang surja yang terbentuk akan bergeser jika dibandingkan dengan gelombang surja pada kondisi normal.
4. Pada motor BLDC dengan keadaan normal, nilai *threshold Test-reff* EAR tiap fasa sebesar 7.1%, 9.87%, 8.2%, sehingga sesuai kriteria *Pass/Fail*. Sedangkan untuk nilai *threshold test-reff* EAR sebesar 10.61%, 7.1%, 9.98%, sehingga nilai tersebut sesuai kriteria *Pass/Fail*.
5. Pada motor BLDC keadaan hubung singkat antar belitan tiap fasa, nilai *threshold test-reff* EAR fasa A memiliki nilai minimal 68.67%, fasa B nilai minimal 69.06%, fasa C nilai minimal 66.36%.
6. Pada motor BLDC dengan keadaan hubungsingkat antar belitan antar fasa, nilai *threshold test-reff* EAR fasa A-B memiliki nilai minimal 68.29, fasa A-C nilai minimal 62.73%, fasa B-C nilai minimal 59.57%
7. Jika nilai *threshold test-reff* EAR lebih besar dari pada *threshold test-reff* EAR pada saat kondisi normal, maka pada belitan motor tersebut bisa dikatakan mengalami hubung singkat antar belitan.

5.2 Saran

Dalam tugas akhir masih ada yang dikebangkan untuk membantu penelitian untuk kedepannya. Berikut saran yang diharapkan oleh penulis:

1. Pengujian dilakukan dengan alat pembacaan yang lebih baik sehingga detail nilai yang didapat lebih baik serta meminimalisasi nilai drop tegangan yang muncul.
2. Pada penelitian selanjutnya diharapkan untuk menambahkan pengujian dengan motor BLDC yang sudah terpasang sehingga mengetahui perbedaan kondisi antara dua motor dengan kondisi terpasang.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Tashakori and M. Ektesabi, "Fault Diagnosis of In-wheel BLDC Motor Drive for Electric Vehicle Application," no. Iv, pp. 925–930, 2013.
- [2] J. Zhao and Y. Y. July, "Brushless DC Motor Fundamentals Application Note," no. July 2011, pp. 1–19, 2014.
- [3] T. J. E. Miller, *Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives* OXFORD SCIENCE PUBLICATIONS, no. 21. .
- [4] J. Zhao and Y. Yangwei, "Brushless DC Motor Fundamentals Application Note," *MPS, Futur. Analog IC Technol.*, no. July 2011, pp. 7–8, 2011.
- [5] M. A. Awadallah and M. M. Morcos, "Detection of Insulation Failure in BLDC Motors Using Neuro-Fuzzy Systems," pp. 18–21, 2005.
- [6] S. Grubic, R. G. Harley, T. G. Habetler, and J. Restrepo, "Experimental Emulation of Stator Turn Insulation Breakdown During a Surge Test," pp. 498–503, 2011.
- [7] T. Succliftom, D. A. Asfani, I. Made, and Y. Negara, "Deteksi Kerusakan Insulasi Belitan Antar Fasa pada Motor Induksi Menggunakan Tes Surja," no. 1, pp. 1–6.
- [8] A. Silahudin, "DESAIN PERALATAN DIAGNOSTIK MOTOR BLDC PENGGERAK KENDARAAN LISTRIK SECARA OFF-LINE BERBASIS TEGANGAN SURJA," 2017.
- [9] S. Grubic, S. Member, J. M. Aller, B. Lu, and T. G. Habetler, "A Survey on Testing and Monitoring Methods for Stator Insulation Systems of Low-Voltage Induction Machines Focusing on Turn Insulation Problems," vol. 55, no. 12, pp. 4127–4136, 2008.
- [10] J. Wilson, "Current state of surge testing induction machines,"

Iris Rotating Mach. Conf., no. June, pp. 1–13, 2003.

- [11] E. Machinery and P. Engineering, “IEEE Standards,” vol. 2004, no. August, 2004.
- [12] IEEE, “IEEE Guide for Testing Turn-to-Turn Insulation on Form-Wound Stator Coils for Alternating-Current Rotating Electric,” vol. 1992, 1993.
- [13] R. Solutions, “Recommended practice,” 2010.
- [14] L. Winding and C. Winding, “AWA Surge Test Pass/Fail Criteria,” pp. 6–7.

LAMPIRAN

List Program Arduino

```
int pin_out = 13;
int pin_out2 = 12;
//12 ke relay, 13 ke IGBT`

{
  // put your setup code here, to run once:
  Serial.begin(9600);
  pinMode(pin_out, OUTPUT);
  pinMode(pin_out2, OUTPUT);
  Serial.println("pilih saklar");
  Serial.println("1. saklar 1 ");
  Serial.println("2. saklar 2 ");
}
void lcd()
{
  Serial.println("pilih saklar");
  Serial.println("1. saklar 1 ");
  Serial.println("2. saklar 2 ");
}
void loop()
{
  unsigned int data;
  int coba;
  if (Serial.available() > 0)
  {
    data = Serial.read();
    if (data == 52) //4
    {
      Serial.println("saklar 2 on.....");
      digitalWrite(pin_out2, HIGH);
      delay(5000);
      digitalWrite(pin_out2, LOW);
      delay(1);
      digitalWrite(pin_out, HIGH);
      Serial.println("saklar 2 off.....");
      delay(3000);
    }
  }
}
```

```
digitalWrite(pin_out, LOW);  
Serial.println("saklar 1 off.....");  
lcd();  
}  
}  
}
```

BIODATA PENULIS



Penulis memiliki nama lengkap Restu Wicaksono. Lahir di Surabaya pada 24 April 1996. Penulis telah menyelesaikan pendidikan di SD Kuwu 1 Madiun pada tahun 2008, menyelesaikan jenjang Pendidikan smp di SMPN 1 Mejayan Madiun pada tahun 2011, menyelesaikan Pendidikan jenjang SMA di SMAN 1 Surabaya pada tahun 2014. Sekarang tengah menempuh Pendidikan sarjana di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Departemen Teknik Elektro S1 bidang sistem tenaga. Selama masa perkuliahan penulis aktif dalam kegiatan organisasi kemahasiswaan. Penulis memiliki hobi olahraga badminton dan futsal, termasuk suka membaca.